Bruno Agrélio Ribeiro

**Proposta para revelar as preferências de Comitês de
Especialistas a partir do Método AHP: Uma Aplicação ao
Setor Elétrico**

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação
em Engenharia Elétrica da PUC-Rio como requisito
parcial para obtenção do grau de Doutor em
Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Reinaldo Castro Souza

Rio de Janeiro
Julho de 2017

Bruno Agrélio Ribeiro

Proposta para revelar as preferências de Comitês de Especialistas a partir do Método AHP: Uma Aplicação ao Setor Elétrico

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Reinaldo Castro Souza

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Prof. Fernando Luiz Cyrino Oliveira

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

Prof. André Luis Marques Marcato

UFJF

Prof. Pedro Guilherme Costa Ferreira

FGV

Prof. José Francisco Moreira Pessanha

CEPEL

Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 31 de Julho de 2017

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Bruno Agrélio Ribeiro

Graduou-se em Economia pela Universidade de São Paulo (2004). Mestre em Engenharia Elétrica (Métodos de Apoio à Decisão) pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (2011). É especialista em análise e previsão de séries temporais (tema de sua dissertação de mestrado) e tem desenvolvido modelos estatísticos e de séries temporais

Ficha Catalográfica

Ribeiro, Bruno Agrélio

Proposta para revelar as preferências de comitês de especialistas a partir do método AHP: uma aplicação ao setor elétrico / Bruno Agrélio Ribeiro; orientador: Reinaldo Castro Souza. – 2017.

115 f.: il. color.; 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2017.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Setor elétrico brasileiro. 3. Teoria de decisão multicritério. 4. Simulação estocástica. I. Souza, Reinaldo Castro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Ao meu bom Deus,
simplesmente por tudo.

Agradecimentos

Ao amigo Reinaldo, muito mais que um orientador, um exemplo com quem aprendi e aprendo tanto.

Ao primo-irmão Hugo, por ter tornado real o sonho de concluir essa tese.

Aos queridos Pedro e Fernando, pelas ideias e convivência tão prazerosa durante os anos de PUC.

Aos Profs. André Luís Marques Marcato e José Francisco Moreira Pessanha, por aceitarem o convite para compor a banca examinadora.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

À CAPES e PUC-Rio, pelo suporte financeiro.

À minha amada Rayana.

Muito obrigado!

Resumo

Ribeiro, Bruno Agrélio; Souza, Reinaldo Castro (Orientador). **Proposta para revelar as preferências de Comitês de Especialistas a partir do Método AHP: Uma Aplicação ao Setor Elétrico**. Rio de Janeiro, 2017. 115p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Processos decisórios envolvendo um número diverso de critérios são comumente problemas complexos. Em geral, tais problemas procuram atender interesses conflitantes, logo, soluções únicas tendem a não contemplar as preferências de todos os agentes envolvidos no processo. Esse é o caso do problema de seleção de modelos de geração de cenários estocásticos de Energia Natural Afluente (ENA), os quais são insumo ao cálculo do despacho hidrotérmico de médio prazo no planejamento da operação do Sistema Elétrico Brasileiro (SEB). Neste trabalho é proposta uma extensão de um consagrado método de apoio à decisão multicritério, para que este se torne apto a revelar a preferência de comitês de especialistas, e a partir destas preferências reveladas derivar soluções mais adequadas para cada comitê. A aplicação dessa metodologia proposta no contexto do SEB é feita de forma a auxiliar diferentes segmentos do setor (academia, indústria e órgão regulador) a identificarem qual modelo de geração de cenários melhor se adequa às preferências destes segmentos. Para tal, os especialistas destes três setores foram agrupados e a partir da revelação das preferências de cada comitê foi proposta uma nova ordenação dos modelos geradores de cenários. As preferências reveladas para os comitês da academia e da indústria corroboraram as conjecturas sobre as predileções destes setores, fidelidade na representação dos momentos para a academia e capacidade de replicação da variância para a indústria, já a hipótese por predileção à replicação de déficit não pode ser verificada para o comitê do órgão regulador. Dentre as novas soluções obtidas, o modelo melhor classificado para a academia e indústria foi o PAR(p) Multiplicativo e para o órgão regulador o PAR(p) Boot-MC.

Palavras-chave

Setor Elétrico Brasileiro, Teoria de Decisão Multicritério, Simulação Estocástica.

Abstract

Ribeiro, Bruno Agrélio; Souza, Reinaldo Castro (Advisor). **A proposal to disclose the preferences of specialist committees via AHP method: An application to the Electrical Sector.** Rio de Janeiro, 2017. 115p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Decision-making processes involving a large number of criteria are often complex problems. In general, such problems seek to meet conflicting interests, so single solutions tend not to address the preferences of all agents involved in the process. This is the case of the problem of selection models for generation of stochastic scenarios of Natural Inflow Energy (NIE), which are input to the calculation of the medium term hydrothermal dispatch in the planning of the operation of the Brazilian Electric System (BES). This paper proposes an extension of a well-established multicriteria decision support method, so that it becomes able to reveal the preference of expert committees, and from these revealed preferences to derive more adequate solutions for each committee. The application of this methodology proposed in the context of BES is done to help different segments of the industry (academia, industry and regulator) to identify which model of scenario generation best suits the preferences of these segments. To this end, the specialists of these three sectors were grouped and from the revelation of the preferences of each committee a new ordering of the scenario generating models was proposed. The preferences revealed for the academy and industry committees corroborated the conjectures about the predilections of these sectors, fidelity in the representation of the moments for the academy and capacity of replication of the variance for the industry, however the hypothesis for predilection for the replication of deficit was not able to be verified to the regulatory committee. Among the new solutions obtained, the best classified model for the academy and industry was the PAR (p) Multiplicative and for the regulatory committee the PAR (p) Boot-MC.

Keywords

Brazilian Electrical Sector, Multicriteria Decision Theory, Stochastic Simulation.

Sumário

1 Introdução	13
1.1. Relevância e Contribuições	15
1.2. Organização do Documento	16
1.3. Publicações Relacionadas	17
2 Análise Multicritério	19
2.1. Introdução	19
2.2. Revisão Bibliográfica	23
2.3. Método de Análise Hierárquica	28
3 O Viés na Análise Multicritério	41
3.1. Soluções Múltiplas a partir do Viés de Preferências Reveladas	41
3.2. Adaptação do exemplo da escolha de um veículo	42
3.3. Proposição de mecanismo para revelação de preferência	49
4 Estudo de Caso	55
4.1. Setor Elétrico Brasileiro	55
4.2. Modelos Geradores de Cenários	59
4.3. Aplicação do método proposto	66
5 Conclusões e Trabalhos futuros	92
6 Referências	94
Apêndice I Matrizes de Comparações Paritárias do Estudo de Caso	100
Apêndice II Respostas Especialistas do Exemplo Adaptado	111
Apêndice III Modelos PAR(p)	113

Lista de figuras

Figura 1 Estrutura hierárquica genérica (BALDIOTI, 2014)	29
Figura 2 Pesos gerados a partir das respostas dos especialistas	46
Figura 3 Pesos agrupados de acordo com as preferências reveladas	47
Figura 4 Novas soluções locais: G1, G2 e G3	48
Figura 5 Vieses de preferência para a escolha do veículo	51
Figura 6 Campo de viés obtido através da potência do menor viés (G3)	52
Figura 7 conjunto de pesos dado pelas interseções	53
Figura 8 Processo decisório em um sistema hidrotérmico	58
Figura 9 Porcentagem dos aprovados no teste-t	68
Figura 10 Porcentagem dos aprovados no teste de Levene	69
Figura 11 Porcentagem dos aprovados no teste de Kolmogorov-Smirnov	70
Figura 12 Porcentagem dos aprovados no teste de Wilcoxon	71
Figura 13 Porcentagem dos aprovados na análise de Assimetria	72
Figura 14 Porcentagem dos aprovados na análise de Assimetria	73
Figura 15 Box-Plot das correlações cruzadas entre os subsistemas	76
Figura 16 Estrutura hierárquica básica	80
Figura 17 Estrutura hierárquica expandida	81
Figura 18 Matriz de Decisão (BALDIOTI, 2014)	82

Lista de tabelas

Tabela 1 Principais desenvolvimentos recentes sobre viés e decisão em grupo	26
Tabela 2 Escala Fundamental	32
Tabela 3 Exemplo de Julgamento dos Critérios	33
Tabela 4 Exemplo de Julgamento dos Subcritérios	33
Tabela 5 IR (Índice Randômico)	37
Tabela 6 Atributos dos veículos	43
Tabela 7 Julgamentos Especialista 1	44
Tabela 8 Pesos do Especialista 1	44
Tabela 9 Classificação final de veículos conforme julgamento dos especialistas – Solução única	45
Tabela 10 Peso Global (G0) e dos agrupamentos 1, 2 e 3 (G1, G2 e G3 respectivamente)	47
Tabela 11 Soluções locais obtidas a partir dos pesos dos agrupamentos 1, 2 e 3	48
Tabela 12 Pesos global (G0) e locais (G1', G2' e G3') ajustados pelo campo de viés.	53
Tabela 13 Soluções locais obtidas a partir dos pesos dos agrupamentos 1, 2 e 3	53
Tabela 14 Estrutura da Capacidade Instalada no SIN (MME, 2016)	56
Tabela 15 Projeção do Consumo de Energia Elétrica	56
Tabela 16 Propostas de Amostragem de Ruídos no modelo PAR(p)	62
Tabela 17 Modelos utilizados no Estudo de Caso	66
Tabela 18 Resultados da Análise de Sequência Negativa em valores percentuais	74
Tabela 19 Resultados da Análise de Sequência Positiva em valores percentuais	75
Tabela 20 Análise dos Resíduos	77
Tabela 21 Cluster dos Especialistas	82
Tabela 22 Vetor de Prioridades dos Subsistema	83
Tabela 23 Vetor de prioridades final principal	84
Tabela 24 Valores de interesse dos atributos de desempenho (BALDIOTI, 2014)	85
Tabela 25 Valor das alternativas normalizadas	86

Tabela 26 Ordenação final principal das Alternativas	88
Tabela 27 Soluções locais (centroides) dos comitês de especialistas	89
Tabela 28 Distância entre o centro e os clusters	90
Tabela 29 Ordenação das alternativas após equalização no campo de viés	91
Tabela 30 Julgamento dos Critérios	100
Tabela 31 Julgamento dos critérios cont.	101
Tabela 32 Julgamento dos Critérios cont.	102
Tabela 33 Julgamento dos Subcritérios EBAC	102
Tabela 34 Julgamento do Subcritérios EBAC cont.	103
Tabela 35 Julgamento dos Subcritérios EBAC cont.	104
Tabela 36 Julgamento dos Subcritérios ASN	104
Tabela 37 Julgamento dos Subcritérios ASN cont.	105
Tabela 38 Julgamento dos Subcritérios ASN cont.	106
Tabela 39 Julgamento dos Subcritérios ASP	107
Tabela 40 Julgamento dos Subcritérios ASP cont.	108
Tabela 41 Julgamento dos Subcritérios ARM	108
Tabela 42 Julgamento dos Subcritérios ARM cont.	109
Tabela 43 Julgamento dos Subcritérios ARM cont.	110
Tabela 44 Respostas e Resultados dos Especialistas do setor administrativo	111
Tabela 45 Respostas e Resultados dos Especialistas do setor pedagógico	111
Tabela 46 Respostas e Resultados dos Especialistas do setor financeiro	112

*Our greatest weakness lies in giving
up. The most certain way to succeed
is always to try just one more time.*

Thomas Alva Edison

Introdução

A tomada de decisão envolve consequências em níveis gerenciais e pessoais. Tal atividade é extremamente dependente do conhecimento, experiência e habilidade de gestão do chamado ator de decisão, ou seja, a qualidade da decisão é diretamente proporcional à qualidade do decisor (SAATY & PENIWATI, 2012). Tem-se no contexto empresarial, institucional e regulatório uma cadeia complexa que reflete os processos de gestão e tomada de decisão, de modo que é preciso ter lucidez nos aspectos que afetam o alcance de metas e os julgamentos que levam às conclusões válidas. Tal processo deve envolver o discernimento e o bom senso de modo a não ser complexo seu entendimento para nenhuma das partes envolvidas na cadeia (SAATY, 2012).

Um dos principais fatores de motivação para a confecção desta tese foi a observação empírica da existência de certas preferências particulares em cada uma das avaliações dos especialistas. Tais preferências, denominadas de vieses pelo autor, geram subsídios para a criação de agrupamentos, que seguem características comuns, o que permite uma nova abordagem sobre o processo decisório, na qual uma única solução pode ser substituída por diversas soluções, uma para cada conjunto agrupado. Uma hipótese para a existência desses vieses reside no fato da existência de interesses particulares de cada avaliador sobre tal problema, ou seja, especialistas com interesses particulares em comum tendem a fazer parte de um mesmo agrupamento, uma vez que suas respostas tendem a caminhar para a mesma direção no espaço de respostas possíveis. Esse parágrafo será detalhado e enriquecido com exemplos no capítulo 3.

Com essas ideias em mente, trazendo para o contexto energético brasileiro, tem-se a problemática envolvendo o processo decisório do despacho hidrotérmico. Tal questão envolve a decisão de despachar usinas hidrelétricas e usinas termelétricas à luz da capacidade hídrica e, conseqüentemente, do preço da energia. O método de cálculo para tal valor envolve basicamente duas etapas, simulação de cenários e otimização estocástica (MARCATO, 2002). O foco do

presente trabalho envolve a primeira etapa, simulação de cenários, mais especificamente os métodos disponíveis na literatura para geração dos mesmos.

Ao longo dos anos foram propostas diversas formas de geração de cenários sintéticos para aplicação no contexto do despacho hidrotérmico brasileiro, para citar alguns destes desenvolvimentos temos: (PENNA, 2009); (OLIVEIRA, 2010); (CASTRO, 2012); (OLIVEIRA, 2013); (FERREIRA, 2013); (CABRAL, 2016).

Cada uma das propostas apresentou resultados distintos e, de certa forma, incomparáveis diretamente, uma vez que em cada um dos trabalhos foi dado ênfase nas superioridades dos respectivos modelos em relação ao utilizado pelo setor elétrico brasileiro. Porém, é possível encontrar nos trabalhos desenvolvidos certas características estocásticas em comum que são passíveis de avaliação. Dessa forma foi proposto em (BALDIOTI, 2014) um modelo de análise multicritério para comparação dos diversos modelos desenvolvidos. Em tal estudo o autor propõe que se realizem os mesmos testes de aderência em relação ao histórico nas séries geradas em todos os modelos, de modo a padronizar sua avaliação e proporcionar a aplicação do Método de Análise Hierárquica (Analytic Hierarchy Process - AHP), visando a definição do melhor modelo.

O fator que desencadeou a pesquisa desenvolvida neste trabalho foi a necessidade da criação de um mecanismo de auxílio à tomada de decisão que fosse capaz de em um primeiro momento revelar o foco de interesse de grupos de especialistas consultados, agrupados de forma pré-determinada conforme o local onde trabalham, e em um segundo momento incluir esta informação no resultado final. Por exemplo, no processo de escolha do modelo a ser utilizado nas simulações de ENA (Energia Natural Afluente), supõe-se que, para o ONS (Operador Nacional do Sistema), órgão regulador (ONS, 2017), interessa utilizar modelos que gerem mais estabilidade ao sistema, ou seja, que produzam menor déficit. Para a indústria acredita-se ser importante a escolha de modelos cuja incerteza (variância) seja a menor possível, pois permitirá um menor nível de risco. Por fim, para a academia, é pressuposto que o importante seja avaliar o modelo à luz da aderência dos cenários, ou seja, quão condizente com o histórico, a médio e a longo prazo, os mesmos estão.

É importante ressaltar que a escolha da metodologia AHP para a análise dos vieses de preferência reside no fato de esta ser uma metodologia consagrada, de

fácil manuseio matemático e de extrema relevância no contexto de métodos de análise multicritério, pois faz uso de uma álgebra linear clara, compreensiva e de fácil utilização, isto é, os cálculos são intuitivos e é possível interpretar os pesos (GOMES, 2003). Além disso, tal metodologia divide um problema complexo em vários subproblemas mais simples, de forma a ser possível avaliar as características contidas nos subproblemas, como média e variância dos valores.

No contexto de Apoio Multicritério à Decisão (AMD), o processo metodológico reconhece a subjetividade inerente aos atores de decisão de forma que não exista uma melhor alternativa para todos os critérios. O objetivo é de auxiliar o decisor ao longo do processo. Dessa forma, não é buscado uma solução ótima, mas sim uma solução de compromisso entre as partes envolvidas.

1.1

Relevância e Contribuições

O objetivo deste trabalho é propor um mecanismo através do qual seja possível encontrar não somente uma única solução de ordenação, mas diversas soluções atreladas a esta. A necessidade dessa busca por soluções múltiplas reside no fato de que diversos problemas são compostos por indivíduos com interesses divergentes, e a aplicação de uma única classificação global tende a desagradar parte significativa desses indivíduos.

O grande desafio deste trabalho não reside em encontrar tais soluções múltiplas, mas essencialmente em garantir que essas soluções sejam coerentes com a solução global, ou seja, que possam ser utilizadas sem distorcer a resolução do problema. Para tal são propostas medidas para garantir que a adoção das soluções derivadas não perturbe a solução única.

A contribuição dessa adaptação auxiliará aos agentes interessados na modelagem do despacho hidrotérmico na escolha de qual modelo de geração de séries de energia natural afluente utilizar. Cada agrupamento desses agentes, seja operador, seja indústria ou academia, poderá optar pelo uso do modelo que melhor atenda suas preferências particulares, tendo a segurança que o modelo sugerido com base em suas preferências reveladas está em acordo com o modelo melhor classificado globalmente.

No estudo de caso proposto a metodologia AHP original classifica todos os modelos de forma tradicional, dando a mesma importância (ou peso) para todos os especialistas e, após isso, para cada grupo, reclassifica os modelos de forma a atender as peculiaridades de cada um.

A ideia em torno da identificação da preferência revelada é pré-determinar a influência dos agrupamentos de especialistas consultados na ordenação final e definir uma medida que exponha as dispersões dos mesmos.

O diferencial deste trabalho é considerar que, a partir de julgamentos consistentes, de acordo com a regra definida em (BALDIOTI, 2014), existe um comportamento padrão entre especialistas que atuam em uma mesma área do setor elétrico, e que não necessariamente, corresponde ao comportamento conjunto de todos os especialistas. Tal distinção de comportamento, denominado pelo autor como viés de preferência, é analisado e considerado como mais uma fonte de informação para os tomadores de decisão. Vale ressaltar que em um contexto de apoio à decisão sabe-se que não existe uma resposta ótima quando se analisam questões que envolvem julgamentos de opções tangíveis e intangíveis.

Ao permitir aos agentes do mercado de energia identificar modelos para despachos eficientes, pode-se melhorar o cálculo do preço da energia pelo despacho hidrotérmico através da parametrização adequada dos modelos geradores de cenários estocásticos.

1.2

Organização do Documento

A partir do exposto, os capítulos da tese foram divididos de forma a englobar todos os pré-requisitos necessários para o seu entendimento, bem como, em seguida apresentar as contribuições científicas desenvolvidas.

Dessa forma, no capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre temas relacionados a este estudo e são expostas as principais características da análise multicritério, abordando o método de análise hierárquico (AHP) e as críticas inerentes a ele. A proposição de adaptação da metodologia AHP para aceitação de múltiplas soluções a partir das preferências reveladas é desenvolvida no capítulo 3, onde são expostos as análises e o objetivo da modelagem. O capítulo 4 aborda os modelos geradores de cenários sintéticos utilizados no

contexto da otimização para o cálculo das políticas de despacho. Nele apresenta a formulação básica do modelo autoregressivo periódico (PAR), os testes utilizados para avaliação de desempenho do modelo e também o modelo autoregressivo periódico com resíduo multiplicativo. Além disso, no capítulo 4 é apresentado um breve resumo sobre o Setor Elétrico Brasileiro (SEB), apontando as principais características do Sistema Interligado Nacional (SIN) e do planejamento da operação hidrotérmica. Por fim, é proposto o estudo de caso, no qual são exibidos os resultados da geração de cenários do modelo PAR(p) com resíduos multiplicativos e, em seguida, a análise multicritério com múltiplas soluções. O último capítulo elucida as conclusões e limitações, assim como os trabalhos futuros acerca da modelagem proposta.

1.3

Publicações Relacionadas

Durante o processo de elaboração dessa tese foram submetidos alguns trabalhos em periódicos e congressos nacionais e internacionais, com participação do autor, acerca dos modelos de planejamento do SEB e que contribuíram para o desenvolvimento da pesquisa e da modelagem proposta.

RIBEIRO, B. A.; BALDIOTI, H. R.; SOUZA, R. C. Multicriteria Approach For Evaluation Of Scenarios Generation Models Applied To The Medium-Term Hydrothermal Operation Planning. In: International Symposium of the Analytic Hierarchy Process, 2014, Washington, D. C. Proceedings of the International Symposium on the Analytic Hierarchy Process for Multicriteria Decision Making, 2014.

RIBEIRO, B. A.; OLIVEIRA, F. L. C.; SOUZA, R. C. . A multicriteria approach to sort time series models applied to stochastic scenarios generation. In: 20th Conference of the International Federation of Operational Research Societies, 2014, Barcelona, Spain. Anais do IFORS 2014, 2014.

RIBEIRO, B. A.; SOUZA, R. C.; MARCATO, A. L. M; OLIVEIRA, F. L. C.; DIAS, B. H.; FERREIRA, P. G. C.; BALDIOTI, H. R. Modelos de Otimização do Despacho Hidrotérmico. In: VIII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, 2015, Costa do Sauípe, Bahia. Anais do VIII CITENEL, 2015.

RIBEIRO, B. A.; SOUZA, R. C.; BALDIOTI, H. R. Identification and Analysis of specialists bias and its influence at ranking the alternatives. In: 18th Latin-Iberoamerican Conference on Operations Research, CLAIO 2016, Santiago-Chile.

RIBEIRO, B. A.; SOUZA, R. C.; BALDIOTI, H. R. Modelo PAR(p) com resíduo multiplicativo aplicado na simulação de cenários de energia natural afluyente. In: XLIX Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, SBPO 2017, Blumenau-SC. Anais do XLIX SBPO, 2017.

RIBEIRO, B. A.; SOUZA, R. C.; BALDIOTI, H. R. Evaluation of scenarios generation models applied to the hydrothermal operational planning. A brazilian case. In: Mathematical Problems in Engineering, special issue: Building Mathematical Models for Multicriteria and Multiobjective Applications, 2017 (Submetido em junho de 2017).

2

Análise Multicritério

2.1

Introdução

A análise multicritério caracteriza-se por um conjunto de procedimentos que visa orientar o tomador de decisão através da construção de um modelo (KEENEY, 2013), envolvendo a escolha de alternativas. É natural que o processo de tomada de decisão, independente do contexto, seja influenciado através da análise de diversos fatores de forma que as alternativas a serem selecionadas respeitem certos critérios, ou atributos, pré-definidos. Tal problemática é definida como análise multicritério ou auxílio multicritério à decisão (AMD). O objetivo de tal análise é fazer com que o agente de decisão pense de forma sistemática sobre os problemas complexos para melhorar a qualidade das decisões resultantes (CLEMEN & REILLY, 2004). As metodologias existentes para o exposto desenvolvimento são um ferramental poderoso e de uso crescente no ambiente organizacional, além disso, encontram seu lugar nos mais diversos contextos.

Há muitos anos estuda-se uma maneira de sistematizar o processo de decisão em que muitos atributos e alternativas estão envolvidos. Ao observar a evolução do pensamento humano, fica evidente a capacidade de abstrair as informações de determinadas situações. Tal abstração permite a criação de classes de respostas, sobrepondo a necessidade de respostas individuais. Essa capacidade passa a viabilizar complexos processos decisórios (SAATY, 2010). Em termos históricos, ainda na época dos filósofos Platão e Sócrates, acreditava-se que o método de tomada de decisão poderia ser melhorado através do aperfeiçoamento dos procedimentos mentais que conduziam esse processo. Durante a Segunda Guerra Mundial os métodos multicritérios estruturados começaram a surgir da necessidade da estruturação matemática dos problemas logísticos enfrentados na guerra (GOMES, 2007).

Segundo (FERNANDES, 2009) as primeiras metodologias estruturadas surgiram ao longo dos anos 60 e 70, destacando-se os métodos:

- ELECTRE de Bernard Roy na França, que futuramente se tornaria uma família de métodos;
- AHP de Thomas L. Saaty nos Estados Unidos e, por fim;
- MAUT de Keeney e Raiffa, também nos Estados Unidos.

O AMD (Auxílio Multicritério à Decisão) é uma corrente de pensamento recente que tem como característica a análise de determinado problema sob a luz de vários critérios conflitantes e o reconhecimento da subjetividade inerente aos atores de decisão (SOUZA, 2013).

Isto posto, sua utilização está sujeita ao entendimento de que não existe a melhor alternativa para todos os critérios, sendo assim, o objetivo é auxiliar o processo decisório a partir da estruturação de um modelo que seja capaz de avaliar a volatilidade das alternativas em julgamento realizando uma análise de sensibilidade. Portanto, essa metodologia não busca a solução ótima, mas uma solução de compromisso, em que deve prevalecer o consenso entre as partes envolvidas (GOMES & GOMES, 2012).

Estão envolvidas em um processo decisório diversas partes com objetivos e funções específicas. Seu entendimento é de fundamental importância para o decorrer deste estudo. Dessa forma, segue os conceitos básicos de tais partes segundo (GOMES, 2007), (GOMES & GOMES, 2012), (CAMPOS, 2011) e (BALDIOTI, 2014):

- Decisor: é um indivíduo ou grupo de indivíduos responsável por avaliar as alternativas de acordo com a sua relação de preferência. O decisor tem a responsabilidade de ratificar uma decisão e assumir suas consequências. Para tal função também foi utilizado o termo “especialista” ao longo do texto;
- Analista: é o consultor multicritério formado por uma pessoa ou equipe com conhecimentos específicos no processo de tomada de decisão e tem como função auxiliar o processo decisório, sistematizando o processo e modelando as preferências;
- Facilitador: responsável pelo esclarecimento, negociação e comunicação, conducente à tomada de decisão com os decisores. Deve manter uma postura neutra para não influenciar os julgamentos dos mesmos.

Ainda segundo os mesmos autores, seguindo as definições básicas para o desenvolvimento dos modelos multicritério, no que tange a estruturação dos métodos, três conceitos são necessários para a compreensão do AMD:

- Objetivo – representa a definição da problemática, podendo ela ser de escolha, classificação, ordenação ou descrição;
- Alternativas – são as opções para a tomada de decisão, também chamadas de ações potenciais;
- Atributos – são os fatores que influenciam as alternativas, ou seja, permitem a comparação entre as ações potenciais por um dado ponto de vista. Também são chamados de critérios e subcritérios, dependendo da estrutura definida.

Para sistematizar as etapas em que os atores envolvidos no processo de tomada de decisão devem atuar é sugerido por (GOMES, 2007) que se divida o processo em sete fases:

1. Identificação dos atores envolvidos no processo decisório;
2. Definição e escolha de alternativas viáveis. É necessário que as alternativas escolhidas sejam plausíveis, principalmente se existem muitas opções e deve-se lembrar que quanto mais alternativas, mais julgamentos serão necessários;
3. Definição de critérios. Todos os fatores relevantes devem ser incluídos para análise, sem que se perca a praticidade. É necessário que se analisem os critérios propostos para que se excluam as redundâncias;
4. Julgamento das alternativas sob os variados critérios. As alternativas são quantificadas em relação aos critérios para que elas sejam comparáveis entre si;
5. “Determinação da importância relativa dos critérios”. Nessa fase são alocados os pesos, ou índices de importância relativa, nos critérios;
6. Determinação das soluções. É a aplicação do método multicritério em si pela síntese dos resultados;
7. Análise de robustez ou sensibilidade. É a fase em que a sensibilidade do modelo é testada em relação a variações reais no cenário em que se insere o problema de decisão. Em outras palavras, consiste em

estudar mudanças nas alternativas devido a variações nos atributos. Pode ser classificado como tendo estabilidade fraca ou forte, dependendo de como a solução se degrada a um nível predeterminado, basicamente a ideia é testar o grau de variação necessário para que haja uma modificação na prescrição da(s) alternativa(s).

Nota-se que o método multicritério somente é empregado na fase 6. Assim sendo, independente do modelo escolhido, generaliza-se o processo de tomada de decisão. Fica claro a importância de se executar as respectivas fases da melhor maneira possível, de modo que o método em si tenha uma pequena parcela de importância na qualidade final do resultado.

Segundo (GOMES & GOMES, 2012) destacam-se basicamente duas vertentes para abordagem multicritério discreta, ou seja, que envolvem um número finito de alternativas. Destacam-se na Escola Americana a Teoria de Utilidade Multiatributo (MAUT) e o *Analytic Hierarchy Process* (AHP), enquanto na Escola Francesa tem-se as famílias dos métodos ELECTRE e PROMÉTHÉE. As abordagens de problemas contínuos, com alternativas infinitas, também são denominadas métodos de otimização multicritério. Alguns métodos discretos, em especial os métodos híbridos, não se enquadram em nenhuma das duas escolas, porém utilizam elementos de ambas.

Na Escola Americana assume-se que todos os estados são comparáveis, existe transitividade na relação de preferência e existe transitividade nas relações de indiferença, tal abordagem gera uma função de utilidade para cada alternativa. Em contrapartida, a Escola Francesa considera a onipresença da subjetividade no processo decisório, o paradigma da aprendizagem pela participação, a convicção do construtivismo e o reconhecimento das limitações do ótimo matemático. Em (GOMES & GOMES, 2012) são explorados mais profundamente os conceitos e características particulares de cada uma das Escolas.

A razão da escolha do AHP reside na estruturação e simplicidade deste método, o qual permite a subdivisão da análise em hierarquias, facilitando o entendimento do problema e das comparações paritárias. Além disso, é importante destacar que tais comparações são de fácil assimilação e entendimento. Isso posto,

o próximo item se dedica a descrever a metodologia em detalhes, discutindo não só sua aplicação, mas também as críticas e limitações do modelo.

2.2

Revisão Bibliográfica

O desenvolvimento de metodologias que buscam entender e quantificar processos de decisão, tanto sobre questões tangíveis, quanto sobre as intangíveis, vem sendo estudado há muitos anos, em especial na década de 70, quando Thomas L. Saaty apresenta um estudo utilizado para solucionar problemas de guerra que foi estruturado no método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) (SAATY, 1991). Desde o início de seu desenvolvimento, Saaty se preocupa com questões metodológicas e até os dias de hoje produz contribuições para o seu método. Uma revisão bem aprofundada dos principais desenvolvimentos da metodologia AHP ao longo dos anos pode ser encontrada em (ISHIZAKA & LABID, 2011); outro artigo que foca em aplicações da metodologia, apresentando 150 delas e analisando 27 de forma aprofundada está em (VAIDYA & KUMAR, 2006). Ambas as leituras são recomendadas, bem como o livro base escrito por Saaty sobre o método.

Tendo como foco principal a questão envolvendo o viés nos julgamentos e decisões em grupo, os parágrafos a seguir apresentam um resumo dos trabalhos desenvolvidos ao longo dos anos julgados relevantes para o contexto desta tese. Em seguida é apresentado uma tabela com as principais discussões acerca do viés em trabalhos recentes.

É apresentado em (SAATY, 1977) uma investigação sobre a utilização de um método de escala que utiliza o autovetor principal de uma matriz positiva de julgamentos. A consistência dos dados da matriz é definida e medida por uma expressão envolvendo a média dos autovalores não principais. Tem-se $\lambda_{max} = n$ como condição necessária e suficiente para consistência dos julgamentos, sendo que duas vezes tal medida equivale à variância dos erros julgados.

De uma forma detalhada em (SAATY, 1987) o AHP é introduzido como um método de medida com proporções de escala. São dados os axiomas e alguns dos pontos centrais subjacentes da teoria. Dá-se ênfase especial à consistência e à forma de medida, apresentando exemplos e justificativas para a preservação e a

alteração do ranking em medidas relativas. Também comenta sobre julgamentos em grupos, as diferenças entre grupos diferentes, principalmente quando estão claramente distintos em determinadas posições da matriz. A solução para tal questão é realizar uma análise individual da consistência para cada uma das posições, de forma que o julgamento gerador da maior consistência para o problema será o julgamento utilizado.

De forma relevante (DONEGAN & DODD, 1991) apresentam uma discussão acerca do Índice Randômico (IR), propondo novos Índices Críticos (IC) estatisticamente significantes e, por fim, apresentam uma possível anomalia utilizada para calcular os ICs no passado e que ainda é utilizado.

Em (MCMEEKIN, 1994), o autor trata da remoção do viés não intencional dos julgamentos no AHP. Esse comportamento reflete uma hierarquia cíclica, uma vez que existe uma dependência estrutural das alternativas em relação aos critérios e isso viola o princípio da composição hierárquica proposta no método original. É proposto que a análise de sensibilidade só deve ser realizada após remoção do viés.

Seguindo a linha de análise do viés, (CONDON, et al., 2003) analisam os vieses de cada grupo de forma a visualizar o vetor de prioridades dos tomadores de decisão. O objetivo é fazer com que os julgamentos sejam mais objetivos, tornando o grupo mais coeso, como uma espécie de time, possibilitando que esse time tenha um objetivo comum claro. Aponta que uma das dificuldades em aplicar o AHP em um grupo é que os tomadores de decisão frequentemente relutam a revelar sua real opinião. Eles podem distorcer suas comparações pareadas de forma a aumentar a probabilidade de um resultado preferido. Este trabalho demonstra a técnica de escalonamento multidimensional, conhecida como mapa de Sammon, que pode ser utilizada para revelar os julgamentos dos especialistas de forma a desencorajar esse tipo de comportamento.

É apresentado em (ALONSO & LAMATA, 2005) um critério de aceitação/rejeição das matrizes recíprocas de comparações pareadas do AHP, bem como um estudo estatístico da consistência das matrizes aleatórias de diferentes tamanhos. O sistema apresentado é capaz de adaptar-se aos diferentes contextos e necessidades dos critérios de aceitação. A vantagem do método para análise de consistência adotado é a introdução de um critério estatístico relativo e da simplicidade do índice utilizado, o autovalor.

Em (OZDEMIR, 2005), o autor defende que um método matematicamente justificável de medida é necessário para que se torne possível que todas as condições acerca dos critérios tangíveis e intangíveis, a fim de apresentar a melhor dentre as alternativas em um processo de decisão, sejam satisfeitas. O AHP e o ANP (*Analytic Network Process*) são métodos que propiciam um modo significativo de combinar tais critérios. As informações provenientes dos julgamentos tendem a ser redundantes, pois quanto mais julgamentos são realizados, mais redundantes elas se tornam. Este trabalho propõe um questionamento sobre quantos elementos comparáveis são necessários, de forma a controlar o crescimento da inconsistência, porém respeitando a necessidade de uma quantidade suficientemente grande que permita a validade do modelo. É proposto a utilização do método gradiente, no qual o tomador de decisão é sensível e aceita uma extensão do problema. O trabalho também propõe a divisão do problema em diversos clusters de elementos com pivotamentos que conectam suas medidas em uma única escala.

Abordando o tema de decisão em grupo, o artigo de (SSEBUGGAWO, et al., 2009) mostra como o AHP pode ser usado para ajudar os especialistas a chegarem a um consenso sobre a qualidade dos diferentes aspectos da modelagem em um processo de julgamento colaborativo.

Com a intenção de melhorar a identificação dos vieses nos julgamentos individuais, e conseqüentemente, a consistência da matriz de decisão, (KOU, et al., 2014) propõem um método (produto de Hadamard) para identificar a matriz de viés de forma a detectar o elemento inconsistente do julgamento, visando melhorar a consistência através de uma fórmula também proposta no trabalho.

O trabalho de (ERGU, et al., 2014) é focado em conduzir uma série de simulações para validar o modelo da matriz de viés induzido, cujo objetivo é melhorar a consistência dos julgamentos.

Em (GOMES, et al., 2015) os autores levantam a questão relacionada ao problema que o decisor enfrenta ao precisar escolher mais de uma alternativa em um ambiente de decisão múltipla. É proposto que se combine as alternativas em grupos e os critérios sejam avaliados à luz desses grupos.

Por fim, (KOCZKODAJ, et al., 2016) apresentam a diferença entre métodos de análise pareadas e o método AHP, apontando as particularidades de cada um e

ressaltando suas diferenças, uma vez que há uma confusão no senso comum ao considerar que o AHP é o único método que faz uso de comparações pareadas.

Foi apresentado nos parágrafos anteriores uma visão geral das publicações acerca da metodologia AHP no que tange o contexto desta tese, mais especificamente discussões que permeiam a questão relacionada ao viés de decisões em grupo, assuntos esses diretamente relacionados à abordagem dada no presente trabalho. A seguir são apresentados na tabela 1 breves comentários sobre a relevância de cada um desses desenvolvimentos.

Tabela 1: Principais desenvolvimentos recentes sobre viés e decisão em grupo.

Referência	Comentários
(SAMMON JR., 1969)	Apresenta um algoritmo para mapear dados multivariados.
(RAMANATHAN & GANESH, 1994)	Analisa dois métodos para agrupamento de julgamentos individuais em grupos de mesma preferência.
(FORMAN & PENIWATI, 1998)	Propõe que a escolha do método de agregação dos julgamentos individuais seja feita observando se os especialistas agem individualmente ou em grupo.
(BOLLOJU, 2001)	Investiga uma forma de identificar subgrupos homogêneos de especialistas baseado em preferências similares.
(CONDON, et al., 2003)	Utiliza o mapa de Sammon para visualização das decisões individuais com o intuito de desencorajar um comportamento de julgamento enviesado proposital.
(ESCOBAR & MORENO-JIMÉNEZ, 2007)	Apresenta um método que lida com o processo de decisão multi-ator ao utilizar o AHP.
(SAATY & VARGAS, 2007)	Estuda a homogeneidade do julgamento das comparações pareadas e seu impacto na prioridade de grupos.

(GONZÁLEZ-PACHÓN & ROMERO, 2007)	Analisa diferentes metodologias para calcular o vetor de prioridades de um grupo.
(LIN, et al., 2010)	Propõe um método de regressão para estimação dos pesos de modo a verificar a incerteza associada aos julgamentos.
(MA, 2010)	Propõe um método para visualizar as decisões de um grupo com o objetivo de tornar o processo de decisão mais objetivo.
(MIYAGIA, et al., 2012)	Apresenta um método para categorizar as opiniões de grupo e ordenar suas preferências.
(SRDJEVIC, et al., 2013)	Propõe um mapa bi-dimensional de Sammon para gerar uma aproximação visual dos subgrupos e um modelo de convergência por consenso é utilizado na agregação dos indivíduos e dos subgrupos.
(BERNASCONI, et al., 2014)	São estudados vários métodos de agregação de julgamentos para geração da matriz de prioridades com foco nas propriedades empíricas de cada um. É proposto um método para identificar erros no julgamento, bem como uma correção para tal.
(DONG & COOPER, 2016)	Propõe um novo modelo de obtenção de consenso num ambiente de decisão dinâmico utilizando cadeias de Markov.
(AGUARÓN, et al., 2016)	Desenvolve um método para o cálculo da matriz de consistência consensual, na qual agrega os julgamentos de indivíduos em um grupo.

2.3

Método de Análise Hierárquica

O Método de Análise Hierárquica, ou em inglês *Analytic Hierarchy Process* (AHP), pertence a Escola Americana e é utilizado principalmente para análise multicritério discreta, foi desenvolvido por Thomas L. Saaty em meados da década de 70 (SAATY, 1991) e é considerado um dos métodos multiatributo mais utilizados no mercado mundial (GOMES, 2007), devido não só ao seu pioneirismo como também ao seu caráter intuitivo, ou seja, é uma metodologia de fácil assimilação e utilização (PASSOS, 2010), sendo bastante utilizado no Brasil (GOMES, 2003). Em virtude dessa característica há aplicações em diversas áreas, indo do âmbito militar ao da política ambiental. Esse vasto leque de aplicações se deve ao fato do método ser capaz de incorporar atributos tanto quantitativos quanto qualitativos (SOUZA, 2013).

Como o próprio nome sugere, o AHP é uma metodologia baseada na estruturação de uma hierarquia que visa analisar uma função, ou seja, a estrutura hierárquica serve como um veículo para analisar a função e a função modifica a dinâmica da estrutura (SAATY, 1991).

Naturalmente segmentamos o processo de decisão em termos comparativos sendo, no limite, comparações paritárias entre os critérios definidos. De maneira simplória podemos pensar em um exemplo de troca de veículo particular. Como objetivo desse exemplo tem-se a troca do veículo de forma que existem duas opções, um carro de luxo e um carro popular, ou seja, tais opções são as alternativas, e leva-se em conta dois atributos (critérios), preço e beleza. Neste simples caso fica claro que a escolha entre os carros será baseada na comparação paritária entre os critérios preço e beleza, de forma que o atributo com mais relevância será mais importante no processo decisório. O AHP é capaz de estruturar tal problema de forma hierárquica para auxiliar o decisor em sua escolha. Uma rica discussão acerca dos modelos de comparação paritárias é apresentada em (KOCZKODAJ, et al., 2016).

De acordo com (SAATY & VARGAS, 2012) a modelagem AHP pode ser dividida em três etapas, sendo elas a decomposição, os julgamentos comparativos e, por fim, a síntese de prioridades.

Inicialmente decompõem-se o problema em níveis hierárquicos de modo que o primeiro nível seja ocupado pelo objetivo do problema em questão. Os níveis intermediários são destinados aos atributos do processo decisório, podendo ser subdivididos em critérios e subcritérios de modo a facilitar a análise paritária. O último nível é ocupado pelas alternativas a serem julgadas. Tal hierarquia assume uma dependência vertical entre seus níveis, porém não deve existir dependência horizontal (entre seus atributos). A figura 1 apresenta uma estrutura hierárquica genérica com quatro níveis sendo eles: objetivo, critérios, subcritérios e alternativas.

Figura 1: Estrutura hierárquica genérica (BALDIOTI, 2014).

Segundo (SAATY, 1991) uma hierarquia, ou árvore de critérios, bem construída é aquela capaz de promover uma representação da realidade. Esse tipo particular de sistema é baseado no conceito de que entidades podem ser agrupadas em conjuntos distintos sem se influenciarem, ou seja, são considerados elementos independentes. Tal estrutura independente não auxilia muito no processo de tomada de decisão ou de planejamento do problema, por isso é preciso determinar “forças” que definam a influência entre os elementos.

Isto posto, tem-se a segunda etapa do desenvolvimento, determinada pelos julgamentos comparativos. Cabe aos especialistas julgarem a relevância de cada atributo, definindo pesos para cada elemento através de comparações pareadas.

Tais comparações ocorrem entre elementos ligados verticalmente pelo mesmo ramo. Exemplificando a partir da estrutura apresentada na figura 1, o critério 1 será comparado com o critério 2 em relação ao objetivo, ou seja, deve-se identificar qual dos dois critérios é o mais importante e o quanto, tendo como referência o elemento de nível superior. Assim, expandindo essa ideia, as comparações pareadas do nível III serão: subcritério 4 em relação ao subcritério 5; subcritério 4 em relação ao subcritério 6; subcritério 5 em relação ao subcritério 6. Todas tendo como referência o critério de nível superior correspondente, neste caso o critério 2. Ao todo serão necessárias $n(n - 1)/2$ comparações, onde n é a quantidade de elementos a serem comparados (BALDIOTI, 2014).

Após as comparações serem computadas é feita a análise de consistência, a qual possui a finalidade de verificar a coerência do julgamento, o objetivo dessa etapa é avaliar quão afastados da consistência os julgamentos estão. De forma prática, utiliza-se uma medida para avaliar a probabilidade de os julgamentos terem sido realizados puramente ao acaso, tal medida é chamada Razão de Consistência (RC). Por exemplo, uma $RC = 0,3$ implica que há 30% de chance do especialista ter respondido aleatoriamente ao questionário de comparações paritárias (BYUN, 2001). Em (BALDIOTI, 2014) são apresentados exemplos de correção empírica para o caso de julgamentos inválidos. Outros métodos para o cálculo da consistência dos julgamentos foram propostos ao longo dos anos, um deles que merece destaque é apresentado em (ALONSO & LAMATA, 2005), onde os autores propõem um critério estatístico de estimação da consistência.

Por fim, a terceira etapa consiste na síntese de prioridades, ou seja, o cálculo do valor final de cada alternativa, para que seja possível ordenar essas alternativas de acordo com seus respectivos níveis de importância. Para se obter esse valor multiplicam-se as matrizes de prioridades pelos vetores de atributos das alternativas. Em resumo, para cada alternativa será obtida a soma ponderada da importância relativa de cada atributo. Essa soma representará o nível de preferência de determinada alternativa em relação ao respectivo critério (SOUZA, 2013), logo, as alternativas com maior soma serão as preferíveis (PASSOS, 2010). Tem-se formalmente que a função de valor será:

$$F(a) = \sum_{j=1}^n w_j v_j(a) \quad (1)$$

Onde:

$F(a)$ é o valor final de alternativa a .

w_j é o peso do j -ésimo critério;

v_j é o desempenho da alternativa a em relação ao j -ésimo critério.

O vetor w contendo os pesos de todos os critérios é calculado a partir do autovetor extraído da matriz de comparações paritárias entre os critérios, a qual será apresentada na próxima seção. Já o vetor v , contendo o desempenho das alternativas, é obtido de acordo com as características quantitativas destas alternativas. No capítulo 3 será feito um exemplo didático onde será apresentado o passo a passo do cálculo dessa função.

Para agregar julgamentos de diversos especialistas, de acordo com a metodologia proposta por (SAATY, 1991), é necessário calcular a média geométrica de cada elemento dos vetores de pesos, gerando assim um único vetor, o qual representará todos os julgamentos. O presente estudo irá discutir no capítulo 3 uma forma similar de agregar julgamentos de especialistas, porém, utilizando informações previamente conhecidas para tal agregação.

2.3.1

Escala Fundamental

Uma das características mais importantes do método AHP é a definição da Escala Fundamental. Através da mesma é possível avaliar atributos a princípio intangíveis matematicamente de forma intuitiva e direta. Para tanto identifica-se o elemento mais importante e em seguida quantas vezes esse elemento é mais importante em relação a outro (GOMES & GOMES, 2012), seguindo uma tabela pré-determinada da intensidade das importâncias relativas. Proposta por Thomas L. Saaty, a Escala Fundamental é apresentada na Tabela 2 com as respectivas explicações. Vale ressaltar que em um primeiro momento os julgamentos são realizados de forma verbal e posteriormente são associados valores absolutos a estes julgamentos.

Tabela 2: Escala Fundamental.

Intensidade da Importância	Definição	Explicação
1	Igual importância	Ambos os elementos contribuem igualmente para o objetivo
2	Fraca	
3	Importância moderada	Experiência e julgamento favorecem levemente uma atividade sobre a outra
4	Mais que moderada	
5	Forte importância	Experiência e julgamento favorecem fortemente uma atividade sobre a outra
6	Mais que forte	
7	Importância muito forte	Uma atividade é fortemente favorecida sobre a outra e sua dominância é demonstrada na prática
8	Muito, muito forte	
9	Importância extrema	A evidência favorecendo uma das atividades é a maior possível, com o mais alto grau de segurança
Recíprocos dos números acima	Se a atividade i tem uma das intensidades de importância de 1 a 9 quando comparada com a atividade j, então j tem o valor recíproco quando comparado com i	

Fonte: Adaptado de (SAATY & VARGAS, 2012).

Uma vez realizadas as comparações organizam-se as respostas em uma matriz recíproca e quadrada onde as linhas e colunas representam os elementos em comparação. Denotando por a_{ij} , o elemento “a” que ocupa a linha “i” e a coluna “j”, terá seu recíproco na posição de linha “j” e coluna “i”, valendo $a_{ji} = 1/a_{ij}$. De maneira intuitiva pode-se construir essa matriz de n^2 elementos conhecendo apenas os $(n(n-1)/2)$ elementos acima (ou abaixo) da diagonal principal desta matriz, uma vez que é esperado que o valor da comparação entre os critérios A e B seja o inverso da comparação entre B e A, logo, os demais $(n(n-1)/2)$ elementos abaixo (ou acima) da diagonal principal serão obtidos através dos recíprocos desses primeiros elementos. Além disso, os elementos da diagonal principal, os quais comparam um atributo a ele mesmo, serão sempre iguais a 1.

Utilizando como base o exemplo apresentado em (BALDIOTI, 2014) de como a matriz de julgamentos é construída a partir da utilização da escala fundamental tem-se que, dado o objetivo genérico apresentado na figura 1, avalia-se que o critério 1 apresenta importância forte em relação ao critério 2, ou seja, atribui-se o valor 5 (a partir da escala fundamental) para representar esse julgamento. Segue na Tabela 3 a matriz gerada a partir desse julgamento.

Tabela 3: Exemplo de Julgamento dos Critérios.

Objetivo	Critério 1	Critério 2
Critério 1	1	5
Critério 2	1/5	1

Para julgar todos os respectivos subcritérios do critério 2 serão necessárias três avaliações pareadas. Iremos julgar o subcritério 4 em relação ao 5, em seguida o 4 em relação ao 6 e, por fim, o 5 em relação ao 6.

Tendo o critério 2 como referência, avaliamos que o subcritério 5 é mais importante em relação ao subcritério 4, apresentando uma “forte importância”, ou seja, iremos atribuir o valor 5 para esse julgamento. O subcritério 6 apresenta uma “importância demonstrada na prática” em relação ao subcritério 4, dessa forma o valor atribuído a esse julgamento é 7. Por último o subcritério 6 apresenta uma “importância mais que forte” em relação ao critério 5, recebendo o valor 6. A tabela 4 apresenta os resultados desses julgamentos.

Tabela 4: Exemplo de Julgamento dos Subcritérios.

Critério 1	Subcritério 4	Subcritério 5	Subcritério 6
Subcritério 4	1	1/5	1/7
Subcritério 5	5	1	1/6
Subcritério 6	7	6	1

O vetor de prioridades, ou pesos, é obtido a partir das matrizes de comparações paritárias. Calcula-se o autovetor normalizado do máximo autovalor da matriz como indicado na equação 2.

$$Aw = \lambda_{MAX}w \quad (2)$$

Onde:

A é a matriz de julgamentos, também conhecida por matriz de comparações paritárias (quadrada, recíproca e positiva);

w é o autovetor principal, referente aos pesos;

λ_{MAX} é o autovalor principal de A .

O autovetor w , correspondente ao máximo autovalor (λ_{MAX}) da matriz de comparações paritárias, sintetiza os pesos que os critérios recebem baseado no julgamento feito pelos especialistas, ou seja, o critério que receber maior peso será aquele que foi julgado pelo conjunto de especialistas como sendo o mais importante em relação aos demais.

Tendo como suporte o teorema de Perron-Frobenius (MEYER, 2000), Thomas L. Saaty versa que a solução apresenta um único maior autovalor que corresponde a um autovetor de componentes estritamente positivos. As provas e o desenvolvimento dos teoremas envolvendo as matrizes geradas são apresentados detalhadamente em (SAATY, 2010).

2.3.2

Análise de Consistência

Uma das etapas mais importantes do AMD é a análise da consistência dos julgamentos. Essa etapa tem por objetivo avaliar a probabilidade dos julgamentos terem sido realizados ao acaso. Para tanto utiliza-se a medida chamada de Razão de Consistência (RC).

Pode-se utilizar o exemplo de (SAATY, 1991) para ilustrar a coerência de um julgamento. Se uma atividade A_1 é 3 vezes mais importante que A_2 , e a atividade A_1 é 6 vezes mais importante que A_3 , então $A_1 = 3A_2$ e $A_1 = 6A_3$. Se o valor numérico do julgamento A_2 com A_3 for diferente de 2, então a matriz será inconsistente. Uma limitação da escala fundamental também pode levar a julgamentos inconsistentes, caso A seja julgado 6 vezes mais importante que B e B é 6 vezes mais importante que C, então A deveria ser 36 vezes mais importante que C para que o julgamento fosse coerente (adaptado de (GOMES, 2003)).

O desenvolvimento exposto a seguir é baseado em (SAATY, 1991) e (BALDIOTI, 2014).

Para compreender de forma simples e intuitiva a análise de consistência, supõe-se uma matriz consistente, onde as comparações são baseadas em medidas exatas, ou seja, os pesos $w_1, \dots, w_n$ são conhecidos, logo:

$$a_{ij} = \frac{w_i}{w_j} \quad (3)$$

Neste caso, como o julgamento é perfeito para todas as comparações, tem-se que $a_{ik} = a_{ij} \cdot a_{jk}$ para qualquer i, j, k , variando de 1 até n , sendo n a ordem da matriz.

Também vale a seguinte igualdade:

$$a_{ji} = \frac{w_j}{w_i} = \frac{1}{w_i/w_j} = \frac{1}{a_{ij}}$$

Considerando $x = (x_1, \dots, x_n)$ e $y = (y_1, \dots, y_n)$ vetores quaisquer de $\mathbb{R}^n$, pode-se escrever em notação matricial $A \cdot x = y$, onde A é a matriz de julgamentos como se segue:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \frac{w_1}{w_2} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ \frac{w_2}{w_1} & \frac{w_2}{w_2} & \dots & \frac{w_2}{w_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{w_n}{w_1} & \frac{w_n}{w_2} & \dots & \frac{w_n}{w_n} \end{bmatrix}$$

Algebricamente essa operação pode ser representada por:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j = y_i \quad \forall i = 1, \dots, n$$

A partir da equação 3 obtém-se que:

$$a_{ij} \frac{w_j}{w_i} = 1 \quad \forall i, j = 1, \dots, n$$

E, conseqüentemente:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} w_j \frac{1}{w_i} = n \quad \forall i = 1, \dots, n$$

ou

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}w_j = nw_i \quad \forall i = 1, \dots, n$$

Que é equivalente à equação matricial:

$$Aw = nw \quad (4)$$

A equação 4 apresenta w como o autovetor de A atrelado ao autovalor n .

Na prática a_{ij} são os pesos atribuídos “subjettivamente” pelo julgamento dos especialistas a partir da escala fundamental, portanto, à medida em que os valores a_{ij} se afastam da razão w_i/w_j , a equação 4 passa a se tornar inválida, promovendo uma inconsistência na matriz de pesos e, conseqüentemente, nos julgamentos. Para avaliar o grau dessa inconsistência serão utilizados dois axiomas da álgebra linear.

O primeiro afirma que caso $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ sejam os autovalores que satisfazem a equação:

$$Aw = \lambda w$$

E, além disso, todos os pesos dos atributos sejam iguais, isto é, caso $a_{ij} = 1$ para todo i e para todo j , tem-se que:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = n$$

Sendo assim, partindo da suposição que a equação 4 seja válida, somente um dos autovalores será diferente de zero e o mesmo valerá n , logo, o maior autovalor de A será igual a n .

O segundo axioma afirma que ao variar os elementos a_{ij} de uma matriz recíproca positiva A em pequenas perturbações, então os autovalores também variarão em pequenas quantidades.

Combinando esses dois resultados, é possível afirmar que caso a diagonal principal de uma matriz A possua todos os seus elementos iguais a 1 e, além disso,

seja consistente, pequenas variações nos elementos a_{ij} farão com que o autovalor máximo λ_{MAX} permaneça próximo de n e os demais autovalores restantes, próximos de zero.

Portanto, para calcular o autovetor de prioridades de uma matriz de comparações paritárias A , deve-se encontrar o vetor w que satisfaça a equação 4.

O valor de interesse final para a obtenção de ordenação dos atributos é o autovetor normalizado, ou seja, o vetor cuja soma de seus elementos seja igual a 1. Para isso cada elemento w_i deverá ser dividido pelo somatório de w .

Uma medida de consistência, chamada Índice de Consistência (IC), é utilizada para calcular o desvio de λ_{MAX} em relação à n , uma vez que o uso da escala para os julgamentos gera variações em a_{ij} , alterando λ_{MAX} .

$$IC = \frac{\lambda_{MAX} - n}{n - 1} \quad (5)$$

É intrinsecamente humano que os julgamentos produzam inconsistências, porém, é desejado que essas sejam as menores possíveis. Para verificar a coerência utiliza-se a Razão de Consistência, definida por:

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (6)$$

Onde IR (Índice Randômico) é o índice de consistência de uma matriz recíproca gerada randomicamente, baseada na escala de 1 a 9, com recíprocas forçadas e alterando-se o tamanho da matriz. Na tabela 5 é apresentado o valor do IR para matrizes de ordem 1 até 10 sugerido por (SAATY & VARGAS, 2012).

Tabela 5: IR (Índice Randômico).

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IR	0	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49

Fonte: Adaptado de (SAATY & VARGAS, 2012).

Concluindo, a avaliação da coerência do julgamento será analisada mediante a seguinte regra sugerida em (BALDIOTI, 2014):

- a) $RC \leq 0,1$ = Julgamento coerente;
- b) $0,1 < RC < 0,2$ = Julgamento questionável;
- c) $RC \geq 0,2$ = Julgamento incoerente.

Um exemplo extenso e detalhado analisando a consistência de um julgamento e como corrigi-lo empiricamente é apresentado em (BALDIOTI, 2014). Também é possível observar uma discussão aprofundada sobre consistência em (SAATY, 2010).

2.3.3

Críticas ao AHP

Devido à sua grande difusão e maturidade o método AHP, desde a década de 80, tem sido objeto de críticas (GOMES, 2003). Pode-se destacar seis delas, resumidas em (GOODWIN & WRIGHT, 2010) e descritas a seguir:

- 1) *Conversão da escala verbal para escala numérica. Agentes de decisão utilizando o método da escala verbal de comparação terão seus julgamentos automaticamente convertidos para escala numérica, mas a correspondência entre as duas escalas é baseada em pressupostos não testados. Se for indicado que A é fracamente mais importante que B, o AHP assume que A é 3 vezes mais importante, mas este pode não ser o caso. Muitos autores têm argumentado que o fator multiplicativo de 5 é muito alto para expressar a noção de preferência forte.*
- 2) *Problemas na escala de 1 a 9. Trabalhos experimentais sugerem que quando um atributo ou opção é extremamente mais importante que outro, então ao invés da escala de 1 a 9, relações entre 1 a 3 e 1 a 5 são mais apropriadas. Entretanto, se o tomador de decisão não pretende incorporar proporções extremas para um modelo de decisão, a restrição de comparações pareadas com a escala de 1 a 9 irá gerar inconsistências. Por exemplo, se A é considerado 4 vezes mais importante que B, e B é 4 vezes mais*

importante que C, então para ser consistente, A deve ser julgado 16 vezes mais importante que C, mas isto não é possível.

- 3) Significado das respostas às questões. Os pesos no AHP são induzidos sem referência às escalas que os atributos são medidos. Pode-se mostrar que a metodologia simplesmente avalia a importância relativa dos atributos, sem fazer referências às suas escalas, isso implica em pesos que refletem o valor relativo das pontuações médias das alternativas sobre os diferentes critérios, o que é um conceito difícil para os agentes de decisão conceberem. Isso pode significar que as questões são interpretadas de diferentes maneiras e, possivelmente, erradas.*
- 4) Novas alternativas podem reverter o ranking das alternativas existentes. Essa crítica atraiu muita atenção ao longo dos anos, sendo citada por diversos autores. Por exemplo, suponha que se deseja escolher uma localização para um novo escritório de vendas e os pesos obtidos pelo método forneçam a seguinte ordem de preferência: 1. Albuquerque; 2. Boston e 3. Chicago. Entretanto, antes de se tomar a decisão, um novo local em Denver foi descoberto e o método foi repetido para incluir essa nova opção. Mesmo mantendo a importância relativa dos atributos, a nova análise forneceu a seguinte ordem: 1. Boston; 2. Albuquerque; 3. Denver e; 4. Chicago. Nessa nova rodada houve reversão do ranking entre Albuquerque e Boston. Esse problema resulta da forma em que o AHP normaliza os pesos para somar 1.*
- 5) O número de comparações requeridas pode ser grande. Enquanto a redundância existente no AHP é uma vantagem, ela também pode requerer um grande número de comparações pelo agente de decisão. Por exemplo, um problema com 7 alternativas e 7 atributos vai requerer 168 comparações par a par, o que pode dificultar a aplicação do método.*

- 6) *Os axiomas do método.* Dyer (1990) argumentou que os axiomas do AHP não são fundamentados em descrições do comportamento racional passível de teste, o que foi alvo de resposta por parte de (HARKER & VARGAS, 1990).

3

O Viés na Análise Multicritério

3.1

Soluções Múltiplas a partir do Viés de Preferências Reveladas

Em diversos problemas decisórios complexos, compostos por critérios múltiplos e cuja solução comum precisa atender aos interesses díspares, dificilmente trará satisfação desejada a todos os envolvidos. Na procura por um mecanismo capaz de ampliar esse grau de satisfação individual, sem causar distorções significativas em relação à solução global, surgiu a ideia de agrupar indivíduos com interesses comuns, e a partir desse agrupamento, buscar múltiplas soluções, uma para cada grupo, com a requisição de manter todas essas soluções vinculadas à solução única.

Para enriquecer os resultados de um projeto de P&D do Setor Elétrico brasileiro, buscando alcançar um maior grau de satisfação dos agentes participantes, iniciou-se uma investigação por métodos de apoio à tomada de decisão com esta característica de soluções múltiplas, porém, não foram encontrados modelos com as atribuições necessárias para auxiliar o processo decisório colocado por esta demanda.

O caminho encontrado foi o de adaptar uma metodologia de análise de problemas com múltiplos critérios, de forma que tal metodologia passasse a contemplar a capacidade de gerar múltiplas soluções a partir da solução global. Para essa empreitada optou-se pela adaptação da metodologia *Analytic Hierarchy Process* (AHP) (SAATY, 1991), posto que este é um método amplamente utilizado, simples e com absoluta clareza matemática.

Conforme exposto no capítulo 2, o Método de Análise Hierárquica baseia-se em comparações paritárias entre os critérios previamente definidos no problema. A partir dessas comparações é construída uma ordenação, onde atributos mais relevantes receberão maior peso no processo decisório.

Escolhido o método, o passo seguinte foi pensar no mecanismo para substituir a solução única por um conjunto de soluções derivadas desta. Na

aplicação do método AHP, a influência das preferências dos indivíduos se dá exclusivamente no cálculo dos pesos. Pesos estes que irão determinar a força que cada atributo impactará na solução final.

É importante destacar que essas preferências em nada interferem no valor dos atributos. Para ilustrar essa afirmação, basta observar o exemplo da escolha de qual carro irá trazer mais satisfação ao indivíduo. O peso é definido a partir da importância que o indivíduo dá a preço em detrimento a conforto, ou, como um segundo exemplo, a importância que dá ao consumo em detrimento à potência. Nesta ilustração as importâncias são os pesos, determinadas pelas preferências do indivíduo, já os quantitativos de preço, conforto, consumo e potência são os valores dos atributos. Esses últimos são determinados exclusivamente em função do modelo de cada veículo, não recebendo influência nenhuma dos indivíduos.

Destacado que o mecanismo para substituir a solução única pelo conjunto derivado de soluções deve ser feito exclusivamente em função dos pesos, e tendo em mente que esses pesos podem ser interpretados como pontos em um subespaço do espaço de funções $\mathbb{L}^p$, utilizou-se ferramentas da análise funcional para propor um mecanismo capaz de gerar soluções múltiplas derivadas da solução global. A partir dessa proposição surgiu o conceito de viés de preferências, o qual será explicado em detalhes nos próximos parágrafos.

O conceito do termo viés, de acordo com (MICHAELIS, 2016), representa tendência associada ou determinada por fatores externos. Nos problemas de decisão envolvendo diversos critérios, as preferências dos especialistas carregam interesses particulares desses indivíduos, portanto, indivíduos com características e origens comuns tenderão a ter interesses particulares comuns. A partir dessa intuição, é proposto neste texto o conceito de viés de preferência, o qual será uma espécie de função entre a solução única e a solução de cada agrupamento de indivíduos com similaridade de interesses.

3.2

Adaptação do exemplo da escolha de um veículo

Antes de detalhar estes conceitos e apresentar a matemática de suas estruturas é válido ilustrá-los de forma didática. Para tal, será feito uma adaptação do exemplo encontrado em diversos textos, o qual se refere à decisão multicritério

de escolha de um veículo a ser adquirido por um indivíduo. Nesta situação serão avaliados três critérios: capacidade de carga em litros (CC), capacidade de passageiros (#P) e custo anual (\$\$). Este último critério será a soma de cinco atributos: custo anual do capital investido na aquisição do veículo, desvalorização anual, consumo anual, manutenção anual e seguro anual.

Uma instituição de ensino precisa adquirir uma frota de veículos para transportar materiais e transportar colaboradores. O objetivo principal dessa instituição é minimizar seus custos com transportes, atendendo de forma satisfatória todas as necessidades da empresa. Dada a complexidade de se estruturar a função objetivo para tal processo de otimização, a aplicação da metodologia AHP se torna uma opção prática e com resultados aceitáveis, posto que contabilizará a experiência e conhecimento técnico dos gestores e colaboradores do negócio, experiência e conhecimento estes que irão auxiliar na inclusão de restrições importantes a serem consideradas na resolução do problema.

Essa frota deverá atender a todos os três departamentos da instituição: administrativo, financeiro e pedagógico. Assim, os especialistas consultados foram escolhidos de forma que atendessem duas características: estivessem em funções que demandassem serviços de transporte e que tivessem conhecimento sobre todas as demandas de transporte da instituição. Além disso, para equilibrar melhor o número de especialistas, foram selecionados três indivíduos em cada um dos três setores da empresa, totalizando nove especialistas consultados.

Dentre as opções de veículos previamente selecionados estão: moto, furgão, pick-up, caminhão, hatch e sedan. A seguir é dada a tabela de atributos para cada um desses veículos.

Tabela 6: Atributos dos veículos.

veículo	capacidade de carga em litros	capacidade de passageiros	custo anual*
moto	0	1	R\$4.813,33
furgão	1.000	14	R\$45.266,67
pick-up	1.000	1	R\$30.266,67
caminhão	10.000	1	R\$76.500,00
hatch	300	3	R\$18.633,33
sedan	700	4	R\$31.850,00

*custo anual=custo do capital investido + desvalorização + consumo + manutenção + seguro

Aos nove especialistas foram feitas três perguntas: entre capacidade de carga e capacidade de passageiros, qual critério é o mais importante? Entre capacidade de carga e custo anual, qual critério é o mais importante? Entre capacidade de passageiros e custo anual, qual critério é o mais importante? Em seguida foi solicitado a cada um deles que enumerassem de um a nove, quão mais importante o critério escolhido era em relação ao segundo, sendo um para igualmente importante, três para moderadamente importante, cinco para fortemente importante, sete para muito fortemente importante e nove para extremamente importante.

Dispondo desse conjunto de informações aplicou-se o método AHP para identificar a ordem de preferência dos especialistas sobre as opções de veículos a serem adquiridos.

A partir do conjunto de respostas obtidas, montou-se a seguinte tabela para cada especialista:

Tabela 7: Julgamentos Especialista 1.

E1	COMPARAÇÕES PARITÁRIAS		
	CC	#P	\$\$
CC	1,00	7,00	2,00
#P	0,14	1,00	0,13
\$\$	0,50	8,00	1,00

A leitura da tabela 7 é feita da seguinte forma: o especialista 1 julga que capacidade de carga do veículo (CC) é fortemente importante em relação a capacidade de passageiros (#P), julga também que capacidade carga é algo entre igualmente importante e moderadamente mais importante do que custo anual, e por fim, julga que custo anual é algo entre fortemente importante e extremamente importante em relação à capacidade de passageiros de um veículo.

Para obter os pesos julgados por esse especialista para cada um dos três critérios, bastou calcular o autovetor principal desta matriz e normalizá-lo.

Tabela 8: Pesos do Especialista 1.

	Autovetor	Pesos
CC	1,00	0,57
#P	0,11	0,06
\$\$	0,66	0,37

A agregação dos pesos dos nove especialistas, conforme (ACZÉL & SAATY, 1983), deve ser feita utilizando a média geométrica destes pesos. Após o cálculo dessa média, normaliza-se o resultado e obtém-se um vetor de pesos final w_j . Para encontrar a solução única, ou seja, a ordenação dos veículos que melhor representa o julgamento dos especialistas, bastou multiplicar a matriz de atributos dos veículos, apresentada na tabela 6, de ordem 6x3 por esse vetor final de pesos (w_j), de ordem 3x1, obtendo um vetor de ordem 6x1. A classificação final dos veículos será o vetor obtido na multiplicação após ser normalizado. Tal ordenação é evidenciada na tabela 9 a seguir.

Tabela 9: Classificação final de veículos conforme julgamento dos especialistas – Solução única.

veículo	resultado
caminhão	0,204
furgão	0,191
moto	0,177
sedan	0,082
hatch	0,081
pick-up	0,056

O resultado da ordenação final dos veículos, apresentado na tabela 9, mostra que o caminhão foi o meio de transporte que melhor contemplou as preferências conjuntas dos especialistas, porém, ao apresentarem essa solução única à direção da instituição de ensino, alguns questionamentos importantes surgiram: considerando que os veículos deverão atender a todas as áreas da empresa, após a aquisição do caminhão, a aquisição do furgão é a melhor alternativa? Sabendo da necessidade de um veículo para atender às demandas rápidas, a aquisição de uma moto continua sendo coerente com a solução global?

Para responder a essas questões, um dos responsáveis pela análise decidiu plotar um gráfico que permitisse visualizar o comportamento dos pesos em relação à solução global:

Figura 2: Pesos gerados a partir das respostas dos especialistas.

A partir da figura 2 observou-se três agrupamentos de pontos, no qual o grupo 1 (E1, E2 e E3) contempla respostas de especialistas que priorizaram capacidade de carga em relação à capacidade de passageiros e custo anual, no grupo 2 (E4, E5 e E6) se concentram respostas de especialistas que priorizaram capacidade de passageiros em detrimento a capacidade de carga e custo anual e, por fim, o grupo 3 (E7, E8 e E9) une os especialistas que julgam custo anual como um critério mais importante que capacidade de carga e capacidade de passageiros.

Figura 3: Pesos agrupados de acordo com as preferências reveladas.

Determinado esse agrupamento exclusivamente com base nas preferências reveladas pelos especialistas em seus julgamentos, o passo seguinte foi construir um mecanismo para assegurar que soluções locais derivadas da solução global não impactariam de forma relevante no sistema, ou seja, que garantisse que essas soluções alternativas estariam coerentes com as preferências dos especialistas como um todo e não somente com as preferências reveladas de um dado comitê de especialistas.

Nesse intuito, foi proposto agrupamento dos pesos de cada um dos três grupos aplicando a média geométrica nesses pesos e em seguida promovendo a normalização dos mesmos. Com isso surgiram três novos pesos, *G1*, *G2* e *G3*, conforme a tabela 10:

Tabela 10: Peso Global (*G0*) e dos agrupamentos 1, 2 e 3 (*G1*, *G2* e *G3* respectivamente).

Peso <i>G0</i>	Peso <i>G1</i>	Peso <i>G2</i>	Peso <i>G3</i>
0,2999	0,5863	0,1294	0,1893
0,3358	0,1272	0,7182	0,2209
0,3643	0,2865	0,1524	0,5898

Figura 4: Novas soluções locais: *G1*, *G2* e *G3*.

Ao recalcular a solução para cada um destes novos pesos encontrou-se as seguintes soluções locais:

Tabela 11: Soluções locais obtidas a partir dos pesos dos agrupamentos 1, 2 e 3.

Solução <i>G1</i>		Solução <i>G2</i>		Solução <i>G3</i>	
veículo	resultado	veículo	resultado	veículo	Resultado
caminhão	0,444	furgão	0,432	moto	0,345
moto	0,162	sedan	0,138	furgão	0,177
furgão	0,130	caminhão	0,133	caminhão	0,174
sedan	0,074	moto	0,116	hatch	0,118
pick-up	0,073	hatch	0,114	sedan	0,097
hatch	0,069	pick-up	0,053	pick-up	0,077

3.3

Proposição de mecanismo para revelação de preferência

Apesar de as soluções locais estarem aparentemente alinhadas com a solução global, isto é, nas três soluções locais apareceram apenas os veículos melhor classificados na solução global, faz-se necessário a aplicação de algum método científico para corroborar esse resultado.

Para auxiliar essa missão, foi proposto o conceito de viés de preferência, que tecnicamente será dado pela distância, usando o limite da norma p quando p tende a zero, entre o peso global, G_0 , e o peso do agrupamento i , G_i , isto é, $\lim_{p \rightarrow 0} \|G_0 - G_i\|_p$. A opção pelo uso desse funcional para o cálculo dessa distância justifica-se por conta de dois resultados importantes. O primeiro resultado, encontrado em (ACZÉL & SAATY, 1983), prova que a média geométrica é um funcional capaz de satisfazer as quatro condições necessárias para que uma função seja capaz de sintetizar (agrupar) um determinado conjunto de julgamentos. São elas:

1 – Condição de Separabilidade de (S) : $f(x_1, x_2, \dots, x_n) = g(x_1)g(x_2) \dots g(x_n)$ para todo $x_1, x_2, \dots, x_n$ em um intervalo P de números positivos, onde g é uma função contínua, associativa e cancelativa que mapeia P em um intervalo J . $[(S)$ garante que as influências de julgamentos individuais podem ser separadas.]

2 – Condição de Unanimidade (U) : $f(x, x, \dots, x) = x$ para todo x em P . $[(U)$ garante que se todos os indivíduos fornecerem o mesmo julgamento x , tal julgamento deverá ser também a síntese de todos os julgamentos.]

3 – Condição de Homogeneidade (H) : $f(ux_1, ux_2, \dots, ux_n) = uf(x_1, x_2, \dots, x_n)$ onde $u > 0$ e x_k, ux_k ($k = 1, 2, \dots, n$) estão todos em P . $[(H)$ garante que se todos os especialistas julgarem, individualmente, determinado critério u vezes maior que um segundo critério, então o agrupamento de todos os julgamentos desse critério será u vezes maior que o agrupamento de julgamentos desse segundo critério.]

4 – Condição de Potência (P_p) : $f(x_1^p, x_2^p, \dots, x_n^p) = f^p(x_1, x_2, \dots, x_n)$. [Para $p = -1$ (P_{-1}), essa propriedade garante a característica de reciprocidade (R) , onde $f(1/x_1, 1/x_2, \dots, 1/x_n) = 1/f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, ou seja, a síntese das

recíprocas $(1/x_i)$ dos julgamentos é igual à recíproca da síntese $(1/f(\cdot))$ desses julgamentos.

O segundo resultado relevante, apresentado por (HOURIEH, 2013) é o teorema que atesta que a norma $\|\cdot\|_p$ em $\mathbb{L}^p$ converge para a média geométrica $(\prod_{j=1}^n |x_j|)^{1/n}$ quando p tende zero, ou seja:

$$\lim_{p \rightarrow 0} \|x\|_p = \left(\prod_{j=1}^n |x_j| \right)^{1/n} \quad (7)$$

Onde a norma $\|\cdot\|_p$ em $\mathbb{L}^p$ é dada por:

$$\|x\|_p = \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |x_j|^p \right)^{1/p} \quad (8)$$

De posse desse conjunto de resultados propõe-se que o viés de preferência de um determinado agrupamento i de especialistas, denominado $v_i(Gi, G0)$ seja calculado de acordo com a seguinte expressão:

$$v_i(Gi, G0) = \lim_{p \rightarrow 0} \|G0 - Gi\|_p = \left(\prod_{j=1}^n |g0_j - gi_j| \right)^{1/n} \quad (9)$$

Essa equação pode ser descrita também como a média geométrica aplicada à diferença absoluta das coordenadas de $G0$ e Gi .

Outro novo conceito desenvolvido neste estudo descreve o campo de viés e será denotado por v_{min} , onde:

$$v_{min} = \min_i [v_i(Gi, G0)] \quad (10)$$

Tal medida representa o menor viés de preferência dentre todos os vieses calculados. Em breve será apresentada a finalidade deste instrumento.

Dentro do espaço de possíveis soluções para a definição dos pesos, o viés de preferências $v_i(Gi, G0)$ pode ser interpretado como uma espécie de medida de potência de um vetor gradiente que parte da solução global $G0$ em direção à

solução local G_i , porém, como não existe uma função objetivo, o viés segue como uma alternativa para o cálculo deste gradiente. A figura 5 a seguir procura dar uma ilustração visual deste conceito.

Figura 5: Vieses de preferência para a escolha do veículo.

Uma segunda interpretação do viés advém da decomposição da solução global em componentes locais, as quais são obtidas através dos agrupamentos de pesos. Tal interpretação é assegurada pela condição de Separabilidade mencionada anteriormente. Portanto, está garantido que a solução local faz parte da solução global, porém, resta garantir que a adoção de uma solução local não irá impactar a solução única, isto é, que os efeitos implicados pela escolha de solução local, produzirão consequências similares para o decisor quando comparados aos efeitos da solução global.

Usando esse conceito de decomposição em componentes, os pesos produzidos pelos agrupamentos de especialistas causam uma força de atração sobre o peso produzido pelo conjunto total do sistema. No intuito de garantir que tais forças irão causar efeitos de magnitude similar é proposto o uso da medida de campo de viés para homogeneizar tais magnitudes. Esta medida é obtida através da menor influência local sobre a solução global, conforme a sua formulação:

$v_{min} = \min_i [v_i(Gi, G0)]$. Observa-se na figura 6 que a partir do campo de viés é possível construir um campo de força ao redor da solução global, capaz de delimitar em sua borda, soluções com mesma intensidade de ação sobre a solução única.

Figura 6: Campo de viés obtido através da potência do menor viés (G3).

O passo final para assegurar a equidade de influência das soluções locais é obtido através do cálculo da interseção dos vieses de preferência com o campo de viés, denotada por Giv_{min} . Para tal, é proposta a seguinte fórmula:

$$Giv_{min} = (Gi - G0) \times \frac{v_{min}}{v_i(Gi, G0)} + G0 \quad (11)$$

O cálculo de Giv_{min} irá proporcionar um novo conjunto de pesos, os quais deverão ser normalizados e aplicados novamente na matriz de atributos. Isto irá garantir que todas as novas soluções locais, derivadas da solução global, possuem mesma capacidade de influência sob a decisão global. A figura 7 ilustra esse novo conjunto de pesos dado pelas interseções. Como o peso do agrupamento 3 é o menor viés, e, portanto, o viés responsável pela medida do campo de viés, o mesmo se encontra exatamente sobre o campo.

Figura 7: Conjunto de pesos dado pelas interseções.

Aplicando os novos pesos, apresentados na tabela 12, sobre o conjunto de atributos mostrados na tabela 6, obtém-se as soluções locais, validadas pelo campo de viés, conforme a tabela 13.

Tabela 12: Pesos global (*G0*) e locais (*G1'*, *G2'* e *G3'*) ajustados pelo campo de viés.

Peso <i>G0</i>	Peso <i>G1'</i>	Peso <i>G2'</i>	Peso <i>G3'</i>
0,2999	0,5354	0,1989	0,1893
0,3358	0,1643	0,5622	0,2209
0,3643	0,3003	0,2389	0,5898

Tabela 13: Soluções locais obtidas a partir dos pesos dos agrupamentos 1, 2 e 3.

Solução <i>G1'</i>		Solução <i>G2'</i>		Solução <i>G3'</i>	
veículo	resultado	veículo	resultado	veículo	Resultado
caminhão	0,4296	furgão	0,358	moto	0,349
moto	0,1797	caminhão	0,185	furgão	0,179
furgão	0,1554	moto	0,161	caminhão	0,176
sedan	0,0823	sedan	0,125	hatch	0,120
hatch	0,0775	hatch	0,110	sedan	0,098
pick-up	0,0755	pick-up	0,061	pick-up	0,078

O papel do campo de viés deve ser interpretado como equalizador da influência das soluções locais originais ($G1$, $G2$ e $G3$) sob a solução global ($G0$), ou seja, através do campo de viés obtém-se soluções modificadas ($G1'$, $G2'$ e $G3'$), cuja a adoção de qualquer uma delas gera impacto idêntico sob a solução global.

Observa-se através das tabelas 11 e 13 que não houve alteração nos veículos classificados como melhor alternativa, porém, houve alterações de classificação a partir da segunda melhor opção, fato que pode ser visto no agrupamento 2, onde antes a segunda melhor escolha era o sedan e após a aplicação do campo de viés passou a ser o caminhão. Tal fato permite a seguinte conclusão: para sistemas com pesos equilibrados, a aplicação do campo de viés pode vir a promover reversão de preferência, ou seja, alterar o item melhor classificado.

4

Estudo de Caso

4.1

Setor Elétrico Brasileiro

Esta seção apresentará resumidamente os conceitos básicos do Setor Elétrico Brasileiro (SEB). Tais conceitos são importantes, porque a discussão apresentada neste trabalho envolve aspectos do setor elétrico, bem como uma aplicação direta da metodologia apresentada. Devido ao contexto do planejamento de médio prazo será abordado uma visão geral do assunto.

4.1.1

O Sistema Interligado Nacional (SIN)

De acordo com (ONS, 2017) o sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil é um sistema hidro-termo-eólico de grande porte, com tamanho e características que permitem considerá-lo único em âmbito mundial, com predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários.

A capacidade instalada de geração do SIN é composta, principalmente, por usinas hidrelétricas distribuídas em dezesseis bacias hidrográficas nas diferentes regiões do país. Nos últimos anos, a instalação de usinas eólicas, principalmente nas regiões Nordeste e Sul, apresentou um forte crescimento, aumentando a importância dessa geração para o atendimento do mercado. As usinas térmicas, em geral são localizadas nas proximidades dos principais centros de carga e desempenham papel estratégico relevante, pois contribuem para a segurança do SIN. Essas usinas são despachadas em função das condições hidrológicas vigentes, permitindo a gestão dos estoques de água armazenados nos reservatórios das usinas hidrelétricas para assegurar o atendimento futuro. Os sistemas de transmissão integram as diferentes fontes de produção de energia e possibilitam o suprimento do mercado consumidor. A tabela 14 apresenta a estrutura da

capacidade instalada do SIN em janeiro de 2016, evidenciando a predominância hidrelétrica.

Tabela 14: Estrutura da Capacidade Instalada no SIN (MME, 2016).

	Potência (MW)	%
<i>Hidráulica</i>	96.929	64,4
<i>Térmica</i>	43.276	28,8
<i>Eólica</i>	10.124	6,7
<i>Solar</i>	80	<0,1
<i>Total</i>	150.410	100

O Sistema Interligado Nacional é constituído por quatro subsistemas, atualmente denominados submercados para o contexto de planejamento de médio prazo, sendo eles: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e a maior parte da região Norte. A interconexão dos sistemas elétricos, por meio da malha de transmissão, propicia a transferência de energia entre subsistemas e explora a diversidade entre os regimes hidrológicos das bacias no país.

É de se esperar que cada subsistema apresente características específicas de consumo e demanda, de forma que a maior carga de demanda se encontra no Sudeste/Centro-Oeste devido à concentração dos maiores consumidores do país. Para ilustrar essa diferença, a projeção do consumo de energia elétrica para 2017 é exposta na tabela 15.

Tabela 15: Projeção do Consumo de Energia Elétrica.

SUDESTE/CENTRO-OESTE	58,65 %
SUL	17,96 %
NORDESTE	15,78 %
NORTE	7,62 %

FONTE: ADAPTADO DE (MME, 2016)

4.1.2

Planejamento da Operação Hidrotérmica

Com o objetivo de minimizar o custo da operação do sistema, o planejamento da operação energética visa principalmente a redução do consumo de combustíveis. As características singulares do SIN fazem com que a coordenação da operação e o planejamento sejam problemas complexos de se lidar. O objetivo de minimização dos custos globais só é atingido com base na interdependência operativa entre as usinas, a interconexão dos subsistemas elétricos e a integração dos recursos de geração e transmissão.

Segundo (MARCATO, 2002), a interconexão entre os sistemas elétricos e a integração dos recursos de geração e transmissão são de suma importância para o planejamento e redução de custos, pois em períodos hidrológicos desfavoráveis em determinadas regiões, outras podem estar em situação hidrológica favorável, reduzindo a necessidade da utilização de energia térmica, por outro lado, em períodos de déficit hidrológicos, as térmicas contribuem para o atendimento da carga. A interdependência operativa entre as usinas acontece porque os reservatórios estão em sequência ao longo das diversas bacias hidrográficas, ou seja, a operação de determinada usina a montante afeta a vazão das usinas a jusante.

Sabe-se que o sistema apresenta uma forte dependência dos regimes hidrológicos. Sendo assim, o planejamento da operação de médio/longo prazo determina metas de geração para as usinas hidrelétricas e termelétricas para cada um dos estágios (períodos) ao longo do horizonte de estudo, sem perder de vista o atendimento à demanda de energia elétrica, às restrições operativas das usinas e às restrições elétricas do sistema (PEREIRA, 1989).

A modelagem estocástica das séries hidrológicas é o insumo para o processo de otimização do desempenho da operação do sistema. Logo, deve ser feita da melhor maneira possível, portanto os modelos geradores de cenários são de suma importância para o contexto energético nacional (BALDIOTI, 2014).

Diariamente o Operador Nacional do Sistema (ONS) toma uma decisão em relação à utilização de energia hidrelétrica ou térmica, impactando diretamente no valor final dessa energia e na garantia de fornecimento. Por exemplo, como apresentado em (OLIVEIRA, 2013), imagine que a decisão tomada foi utilizar as

hidrelétricas para o abastecimento energético, minimizando os custos da operação e, ainda nesse cenário hipotético, as afluições futuras foram boas, para tal situação a decisão foi adequada e não houve gastos extras ou cortes de energia, ou seja, o custo total foi baixo. Agora imagine a mesma decisão, porém, neste segundo caso as afluições futuras foram baixas, para este cenário será necessário despachar as térmicas devido ao baixo volume de água nos reservatórios, isso gerará um gasto extra (o custo total será alto) e um provável corte de carga no sistema. A figura 8 ilustra esse processo de decisão diário.

Figura 8: Processo decisório em um sistema hidrotérmico.

A modelagem que alimenta esse processo de otimização é dividida em diversos subproblemas, sendo que em cada um são definidos diferentes horizontes de planejamento. Além disso, a representação da estocasticidade das afluições e das não-linearidades é caracterizada em diferentes graus de detalhamento para cada um desses subproblemas. Isto posto, é importante destacar que quanto maior o horizonte de tomada de decisão, maior será a necessidade de consideração das incertezas associadas à hidrologia do problema, e menor será o grau de detalhamento na representação elétrica do sistema. Os subproblemas podem ser agrupados em três horizontes, sendo eles: planejamento da operação de médio prazo, planejamento da operação de curto prazo e programação diária da operação.

Na fase do planejamento de médio prazo o horizonte de estudo é de cinco anos, segmentados em etapas mensais (períodos). Faz-se uma representação detalhada do processo estocástico de vazões afluentes aos reservatórios, e as usinas hidrelétricas que compõem cada sistema são representadas de forma agregada (sistemas equivalentes). Além disso, os sistemas podem trocar energia entre si até um limite máximo de intercâmbio pré-definido. O resultante dessa etapa é uma função multivariada que define o valor econômico da energia armazenada em função dos níveis de armazenamento e afluência aos meses passados, chamada função de custo futuro (MARCATO, 2002).

O desenvolvimento estocástico necessário é realizado através de um modelo gerador de séries sintéticas de ENAs (Energia Natural Afluente) que deve ser acoplado de maneira que a estocasticidade seja bem representada, de modo a reproduzir certas características do histórico.

Utiliza-se o modelo NEWAVE para determinação de estratégias ótimas de operação em médio prazo (CEPEL, 2015). A partir das ENAs é ajustado um modelo estocástico auto regressivo periódico de ordem p , a fim de gerar séries sintéticas, tendo como objetivo o cálculo da função de custo futuro. Mais detalhes sobre a modelagem são descritos em (MACEIRA & BEZERRA, 1997), (MARCATO, 2002), (PENNA, 2009), (PENNA, et al., 2011), (CASTRO, 2012), (FERREIRA, 2013), (OLIVEIRA, 2013), (RIBEIRO & BALDIOTI, 2014).

4.2

Modelos Geradores de Cenários

Como dito anteriormente, é de suma importância a utilização de modelos de séries temporais no contexto do planejamento e operação de sistemas hidrotérmicos (SALAS & OBEYSEKERA, 1982), uma vez que, com predominância hídrica no sistema de geração, a previsão e a simulação de cenários são fundamentais. Diversos trabalhos já foram realizados na área utilizando diferentes horizontes de tempo (horário, diário, semanal, mensal e anual).

Desde a década de 60 os modelos Auto Regressivos e Auto Regressivos Periódicos são utilizados no contexto de previsão de sistemas hidrológicos. Ao longo das décadas seguintes diversos autores propuseram melhorias e variações

aos modelos apresentados originalmente. Uma extensa revisão de tais métodos é apresentada em (FERREIRA, 2013).

O estudo de caso proposto nessa tese envolve a utilização de diversos modelos Auto Regressivos Periódicos, que em sua maioria variam a forma de amostrar os resíduos para simulação de séries sintéticas. Os modelos apresentados resumidamente a seguir, e em mais detalhes no Apêndice III, foram propostos nos seguintes trabalhos: (OLIVEIRA, 2010); (OLIVEIRA, 2013); (FERREIRA, 2013). Em seguida são apresentados os testes estatísticos utilizados no modelo multicritério, proposto em (BALDIOTI, 2014) que servirá de base para o estudo de caso discutido mais à frente.

4.2.1

Modelo PAR(p)

Não somente a autocorrelação caracteriza as séries hidrológicas históricas, mas também o intervalo de tempo entre as observações, caracterizando-se dessa forma um comportamento periódico (HIPEL & MCLEOD, 1994). Em especial tem-se o modelo $PAR(p)$, que ajusta para cada período pré-definido um modelo $AR(p)$, onde “ p ” refere-se à ordem do modelo. Para o caso periódico, “ p ” é um vetor de ordens. No caso de interesse, tem-se que $p = 12$, referente a cada um dos meses do ano.

Uma das formas de se apresentar o modelo $PAR(p)$ é em sua forma padronizada, dessa forma, tem-se:

$$\left(\frac{Y_t - \mu_m}{\sigma_m}\right) = \varphi_1^m \left(\frac{Y_{t-1} - \mu_{m-1}}{\sigma_{m-1}}\right) + \dots + \varphi_{p_m}^m \left(\frac{Y_{t-p_m} - \mu_{m-p_m}}{\sigma_{m-p_m}}\right) + a_t^m \quad (12)$$

$$Y_t = \mu_m + \varphi_1^m \sigma_m \left(\frac{Y_{t-1} - \mu_{m-1}}{\sigma_{m-1}}\right) + \dots + \varphi_{p_m}^m \sigma_m \left(\frac{Y_{t-p_m} - \mu_{m-p_m}}{\sigma_{m-p_m}}\right) + \sigma_m a_t^m \quad (13)$$

Onde:

Y_t série sazonal de período $s = 12$;

- t índice de tempo, $t = 1, 2, \dots, sN$, função do ano T ($T = 1, 2, \dots, N$) e do período m ($m = 1, 2, \dots, s$);
- N número de anos;
- μ_m média sazonal do período m ;
- ϕ_m^i i -ésimo coeficiente auto regressivo do período m ;
- p_m ordem do operador auto regressivo do período m ;
- a_t^m série de ruídos independentes com média zero e variância $\sigma_a^{2(m)}$.

O modelo apresentado acima é aplicado ao contexto do SEB nas séries de ENA (Energia Natural Afluente) para cada um dos quatro subsistemas (OLIVEIRA, 2010), apresentados na seção 4.1. As etapas de identificação das ordens “ p ” e a estimação dos parâmetros do modelo são apresentadas detalhadamente em (PENNA, 2009), (OLIVEIRA, 2010), (OLIVEIRA, 2013), (FERREIRA, 2013).

Para este trabalho será apresentado somente a diferenciação básica entre os modelos para que se conheça tais características. Como citado anteriormente, a particularidade de cada modelo está na forma em que os ruídos são amostrados.

Com o objetivo de simular cenários sintéticos é preciso que se faça um “tratamento” nos dados no que diz respeito à modelagem dos resíduos históricos. Para tanto, devido à grande volatilidade dos dados nos diversos subsistemas, é utilizado o modelo padronizado do $PAR(p)$ e, a partir do ajuste, ou seja, uma vez definido a ordem e os parâmetros, calculam-se os erros históricos através da diferença entre o realizado e o ajustado. Especificamente no caso do modelo utilizado pelo NEWAVE é ajustado aos resíduos calculados uma distribuição LogNormal de três parâmetros (CEPEL, 2015) onde a correlação entre os subsistemas é embutida na distribuição ajustada pelo terceiro parâmetro (chamado de deslocamento), dessa forma a característica de complementariedade é preservada na modelagem. Detalhes sobre a modelagem exata podem ser encontradas em (OLIVEIRA, 2013) e (FERREIRA, 2013), sendo que neste último é apresentada a questão das interconfigurações, característica peculiar para geração de cenários sintéticos adotada exclusivamente pelo SEB.

Assim, os modelos a serem considerados como alternativas do AHP, que seguem a modelagem básica apresentada, além da modelagem proposta pelo setor,

utilizando os resíduos ajustados por uma lognormal, diferindo-se apenas em termos da amostragem de ruídos, são apresentados na tabela 16. Isto posto tem-se, a partir da equação 12 e 13, as seguintes variações:

Tabela 16: Propostas de Amostragem de Ruídos no modelo PAR(p).

Referência	Distribuição dos Resíduos
(OLIVEIRA, 2010)	$a_t^m = (\text{resíduo bootstrap})_t^m$
(OLIVEIRA, 2013)	$a_t^m = (\text{resíduo bootstrap_Monte Carlo})_t^m$
A ser publicado	$a_t^m = (\text{resíduo Multiplicativo})_t^m$
A ser publicado	$a_t^m = (\text{resíduo MCMC})_t^m$

4.2.2

Avaliação de Desempenho

Tendo em vista o modelo multicritério a ser estudado, para avaliar as alternativas selecionadas é necessário verificar a aderência dos cenários produzidos em relação ao histórico. Para tanto são realizados testes paramétricos e não paramétricos, descritos em (BALDIOTI, 2014) e apresentados resumidamente abaixo:

- 1) Teste de média (t-test): é utilizado para verificar se as médias dos cenários gerados condizem com o as médias do histórico (CASELA & BERGER, 2001).
- 2) Teste de Variância (Levene): verifica a igualdade das variâncias das populações envolvidas a partir da proximidade da normalidade (ALMEIDA, et al., 2008).
- 3) Teste de Aderência (Kolmogorov-Smirnov): este é um teste não paramétrico e tem como função verificar a forma de uma distribuição de probabilidade comparando-a com a de outra amostra ou com uma distribuição pré-determinada (CONOVER, 1971).

- 4) Teste de Mediana (Wilcoxon): utilizou-se uma variação do teste de Wilcoxon, ou testes de sinais, avaliando-se a mediana. Tal variação é apresentada em (MANN & WHITNEY, 1947).
- 5) Análise de Assimetria: essa análise é proposta em (BALDIOTI, 2014) e avalia a diferença relativa entre a assimetria da série simulada em relação à assimetria da série histórica.
- 6) Análise de Sequência Negativa: tem a capacidade de aferir os modelos em reproduzir as correspondentes distribuições de frequência obtidas do histórico. No caso da sequência negativa o interesse é verificar a capacidade do modelo reproduzir períodos de seca. Esta análise é apresentada em (PENNA, 2009) e (OLIVEIRA, 2010).
- 7) Análise de Sequência Positiva: análogo ao anterior, porém o interesse é verificar a capacidade do modelo em reproduzir períodos de cheia.
- 8) Análise de Correlação Cruzada: foi proposto em (BALDIOTI, 2014) uma análise empírica para a correlação cruzada entre os subsistemas, tanto dos cenários gerados quanto do histórico, e tem como objetivo avaliar como os regimes hidrológicos estão espacialmente correlacionados, através do boxplot das correlações.
- 9) Teste de Média nos Ruídos: é o mesmo teste utilizado para os cenários, t-test, porém avalia-se agora somente os resíduos, com o intuito de verificar se os mesmos apresentam média zero.
- 10) Teste ARCH: o objetivo principal desse teste é avaliar a significância dos efeitos ARCH (ENGLE, 1982), ou seja, verifica se a série de resíduos não apresenta heterocedasticidade condicional.
- 11) Teste de LJUNG-BOX: esse teste também é conhecido como teste de dependência linear e avalia se um grupo de autocorrelações de uma série temporal é diferente de zero (LJUNG & BOX, 1978), (BOX & PIERCE, 1970).

4.2.3

Modelo PAR(p) com resíduo multiplicativo

O modelo PAR(p) multiplicativo, como será apresentado a seguir, pode ser considerado como um caso particular da modelagem desenvolvida em (CABRAL, 2016), onde o autor desenvolve um modelo periódico multivariado autorregressivo multiplicativo, ou PVARm.

Partindo do desenvolvimento inicialmente proposto em (HIPEL & MCLEOD, 1994) e posteriormente adaptado para o contexto do setor elétrico brasileiro com a especificidade de utilizar amostragem de resíduos bootstrap (OLIVEIRA, 2010), juntamente com a conceituação sobre a questão das interconfigurações exposta em (FERREIRA, 2013), pode-se desenvolver o modelo multiplicativo como é descrito a seguir.

Considerando a formulação simplificada da equação 12, pode-se escrever o ruído como se segue:

$$a_t^m = \left(\frac{Y_t - \mu_m}{\sigma_m} \right) - \left[\varphi_1^m \left(\frac{Y_{t-1} - \mu_{m-1}}{\sigma_{m-1}} \right) + \dots + \varphi_{p_m}^m \left(\frac{Y_{t-p_m} - \mu_{m-p_m}}{\sigma_{m-p_m}} \right) \right] \quad (14)$$

Neste caso estima-se o resíduo a partir da diferença entre o realizado e o estimado. Vale ressaltar que o processo de estimação da ordem e parâmetros é desenvolvido da forma como exposto em (FERREIRA, 2013), através do sistema de equação de Yule-Walker e a função de autocorrelação parcial interconfigurações.

No desenvolvimento da proposta do modelo com resíduos multiplicativos considera-se a seguinte formulação:

$$\left(\frac{Y_t - \mu_m}{\sigma_m} \right) = \left[\varphi_1^m \left(\frac{Y_{t-1} - \mu_{m-1}}{\sigma_{m-1}} \right) + \dots + \varphi_{p_m}^m \left(\frac{Y_{t-p_m} - \mu_{m-p_m}}{\sigma_{m-p_m}} \right) \right] \cdot a_t^m \quad (15)$$

Dessa forma, tem-se:

$$\hat{a}_t^m = \frac{\left(\frac{Y_t - \mu_m}{\sigma_m}\right)}{\left[\hat{\varphi}_1^m \left(\frac{Y_{t-1} - \mu_{m-1}}{\sigma_{m-1}}\right) + \dots + \hat{\varphi}_{p_m}^m \left(\frac{Y_{t-p_m} - \mu_{m-p_m}}{\sigma_{m-p_m}}\right)\right]} \quad (16)$$

Para que as características da modelagem básica do PAR(p) sejam preservadas, ou seja, a estimação dos parâmetros e ordens não sejam alteradas, considera-se que o ruído desse modelo segue um comportamento i.i.d. (independente e identicamente distribuído) com a seguinte condição:

$$E[\hat{a}_t^m] = 1 \quad (17)$$

Uma vez estimado o modelo os resíduos multiplicativos são calculados como indicado na equação 16. Dessa forma, é possível gerar amostras de resíduos utilizando a técnica bootstrap (OLIVEIRA, 2010).

A simulação de cenários sintéticos de ENA (Energia Natural Afluente), caso de interesse desta tese, é realizada utilizando o modelo ajustado e as amostras de resíduos. Utilizando a técnica de simulação bootstrap é possível amostrar e, conseqüentemente, gerar tantos cenários quanto se queira. Tais cenários são utilizados como um dos dados de entrada para o processo de otimização que irá calcular o preço da energia.

Vale ressaltar que o caso de interesse e o foco do desenvolvimento foi para o planejamento da operação de médio/longo prazo, de forma que as discretizações do modelo, isto é, a periodicidade, seja mensal. Mais especificamente, o $PAR(p)$ será ajustado para cada período de interesse do estudo, em outras palavras, para cada mês. Dessa forma, para o estudo de planejamento para um horizonte de cinco anos, teremos, ao pé da letra, sessenta modelos.

Um estudo de caso apresentando os resultados do modelo $PAR(p)$ multiplicativo será exposto na seção seguinte.

4.3

Aplicação do método proposto

O estudo de caso proposto nesta tese envolve a geração de cenários sintéticos, ou simulações, de cinco modelos que se baseiam no $PAR(p)$, descrito na seção anterior. Tais modelos se diferenciam na forma de tratamento dado a amostragem de resíduos, de forma que se tem as seguintes variações:

Tabela 17: Modelos utilizados no Estudo de Caso.

Modelo	Distribuição dos Resíduos
$PAR(p) - Lognormal$	$a_t^m = (resíduo\ lognormal)_t^m$
$PAR(p) - Bootstrap$	$a_t^m = (resíduo\ bootstrap)_t^m$
$PAR(p) - Bootstrap\ Monte\ Carlo$	$a_t^m = (resíduo\ bootstrap_Monte\ Carlo)_t^m$
$PAR(p) - Multiplicativo$	$a_t^m = (resíduo\ Multiplicativo)_t^m$
$PAR(p) - MCMC$	$a_t^m = (resíduo\ MCMC)_t^m$

Primeiramente serão apresentados no item 4.3.1 os resultados para o estudo de caso do modelo $PAR(p) - Multiplicativo$. Tais resultados englobam os testes propostos para utilização na etapa de análise multicritério com viés, apresentados no item 4.3.2. Vale ressaltar que foram gerados 200 cenários sintéticos com o período de 120 meses cada, utilizando a modelagem do $PAR(p)$ interconfigurações proposta em (FERREIRA, 2013), para a aplicação dos testes e que o PMO (Programa Mensal da Operação) utilizado foi o de janeiro de 2016.

Em seguida, utilizando a estrutura básica desenvolvida em (BALDIOTI, 2014), será apresentada na seção 4.3.3 a construção do método desenvolvido no capítulo 3.

Vale destacar que toda implementação computacional foi realizada utilizando os programas Matlab e Excel, ambos fornecidos pela PUC-Rio.

4.3.1

PAR(p) Multiplicativo

No intuito de apresentar os resultados encontrados, utilizando a modelagem proposta, serão expostos gráficos e tabelas referentes aos resultados dos testes estatísticos mencionados na seção 4.2, propostos como padronização para avaliação de modelos geradores de cenários sintéticos (BALDIOTI, 2014).

Seguem os testes que serão utilizados:

1. Teste de média (t-test);
2. Teste de Variância (Levene);
3. Teste de Aderência (Kolmogorov-Smirnov);
4. Teste de Mediana (Wilcoxon);
5. Análise de Assimetria;
6. Análise de Sequência Negativa;
7. Análise de Sequência Positiva;
8. Análise de Correlação Cruzada;
9. Teste de Média nos Ruídos;
10. Teste ARCH;
11. Teste de LJUNG-BOX.

Vale lembrar que todo o desenvolvimento é realizado para os quatro subsistemas, sendo que cada um dos testes apresenta quatro resultados. Os quatro subsistemas são: Sudeste/Centro Oeste (1); Sul (2); Nordeste (3); Norte (4). Por questões de simplificação os resultados de cada um dos subsistemas serão indicados pelos seus respectivos números.

Tendo como objetivo principal verificar a aderência dos cenários simulados ao histórico, os testes de (1) ao (8) são realizados nas 200 séries, já os testes (9), (10) e (11) são realizados nos resíduos calculados. Em outras palavras, testa-se o modelo em relação ao histórico e o ajuste de modelo, avaliado através dos resíduos.

4.3.1.1

Teste de Média

Na figura 9 são apresentados os resultados dos testes-t realizados para os quatro subsistemas. Os testes são realizados n vezes, onde $n = n^o \text{ de períodos}$. Assim, em cada período é avaliado a hipótese nula da média dos 200 cenários gerados ser igual a média histórica. Para os 200 cenários gerados n é igual a 120 meses.

Figura 9: Porcentagem dos aprovados no teste-t.

Observa-se que, para o caso acima, apenas no subsistema Norte (4) houve períodos em que a hipótese nula foi rejeitada. Assim, pode-se dizer que o modelo proposto reproduz adequadamente as médias históricas.

4.3.1.2

Teste de Variância

Na figura 10 são apresentados os resultados dos testes Levene, utilizados nas mesmas condições anteriores, para os quatro subsistemas.

Figura 10: Porcentagem dos aprovados no teste de Levene.

Para o teste de Levene, que tem como objetivo avaliar a igualdade das variâncias, observa-se que o comportamento do modelo proposto segue reproduzindo as estatísticas do histórico.

4.3.1.3

Teste de Aderência

Na figura 11 são apresentados os resultados dos testes de Kolmogorov-Smirnov. Tal avaliação foi usada para verificar a igualdade entre as distribuições de probabilidade que descrevem os períodos do histórico e das séries geradas.

Seguindo o comportamento dos testes anteriores, o modelo proposto apresenta um comportamento de aderência em relação ao histórico. Neste caso o pior resultado foi para o subsistema Norte (4), com 94% dos testes aceitando a hipótese nula de igualdade, ou seja, dos 120 períodos testados, aproximadamente 113 seguem a distribuição do histórico.

Figura 11: Porcentagem dos aprovados no teste de Kolmogorov-Smirnov.

4.3.1.4

Teste de Aderência

Na figura 12 são apresentados os resultados dos testes de Wilcoxon para mediana, tal variação é utilizada devido ao tamanho da amostra. Outro motivo para se utilizar esse teste é devido ao fato de não ser necessário assumir normalidade das amostras testadas. Também vale ressaltar que tal teste é não paramétrico.

Mais uma vez o modelo proposto mostra aderência em relação a mediana, de forma que somente o subsistema Norte não tenha todos os períodos aprovados.

Figura 12: Porcentagem dos aprovados no teste de Wilcoxon.

4.3.1.5

Análise de Assimetria

A discussão acerca da capacidade de os modelos representarem as assimetrias vem se tornando cada vez mais relevante no setor elétrico, isso se dá devido à necessidade de uma medida capaz de avaliar a representação do terceiro momento da série histórica. Os regimes de afluências baixos, registrados nos últimos anos e não indicado nos modelos de previsão/simulação de afluências, fomentou a discussão e, também em função disso, o modelo multiplicativo foi estudado nesta tese, uma vez que sua capacidade de reprodução da assimetria é considerada melhor do que a do modelo vigente (lognormal).

Na figura 13 são apresentados os resultados da análise de Assimetria. Tal análise é proposta em (BALDIOTI, 2014) e tem como objetivo avaliar a assimetria de duas populações distintas e desconhecidas que não assumem normalidade. Esta é uma análise não paramétrica que avalia a distância, ou proporção, relativa entre as assimetrias das duas populações. Espera-se que essa distância seja a menor possível, de forma que os períodos “aprovados” estejam localizados abaixo de uma medida pré-definida, no caso 40% (0,4), indicado por

uma linha preta na figura. Em outras palavras, as séries aprovadas são aquelas cujas proporções em relação à série histórica não diverja em mais de 40%. Esse percentual foi obtido através de testes empíricos, e serve apenas como um referencial.

Figura 13: Porcentagem dos aprovados na análise de Assimetria.

Observa-se que o melhor resultado é referente ao subsistema Sudeste, com 75% de aprovação. Vale ressaltar que tal subsistema é o mais importante em termos de geração e carga para o SIN, logo, tal resultado por si só já seria relevante, porém o baixo índice de aprovação para os outros subsistemas nos leva a averiguar mais profundamente o comportamento do modelo, em relação ao desempenho dessa característica, comparativamente ao modelo Lognormal vigente no setor. Dessa forma, é apresentado na figura 14 os resultados do mesmo teste para o modelo utilizado no setor elétrico atualmente.

Figura 14: Porcentagem dos aprovados na análise de Assimetria.

Observa-se a partir de tais resultados que o modelo proposto consegue reproduzir a assimetria com mais acurácia que o modelo vigente. Vale destacar os resultados: para o subsistema sudeste (1) o modelo vigente apresenta um total de 14% de aprovação, enquanto o modelo proposto 75%; no subsistema sul (2) também houve uma melhora significativa nos resultados, de 20% (modelo vigente) para 50% (modelo proposto); nos subsistemas Nordeste (3) e Norte (4), houveram melhoras marginais, de 20% para 28% e 26% para 30%, respectivamente.

4.3.1.6

Análise de Sequência Negativa

Outra métrica importante para avaliação dos cenários gerados, no que tange às características de interesse para o SEB, é a análise de sequência negativa. Tal análise é realizada a partir de três métricas principais. São elas: comprimento de sequência; soma de sequência; intensidade de sequência. Após a aplicação de tais conceitos nas séries geradas e no histórico, testa-se a hipótese de as amostras serem provenientes de uma mesma distribuição, através dos testes estatísticos de

aderência (PENNA, 2009). Uma sequência negativa é o período de tempo em que as vazões afluentes estão continuamente abaixo de valores predeterminados, no caso as médias mensais históricas, precedidos e sucedidos por valores acima desses limites (OLIVEIRA, 2010).

São apresentados na tabela 18 os resultados das probabilidades de representação de sequências negativas das séries geradas.

Tabela 18: Resultados da Análise de Sequência Negativa em valores percentuais.

<i>Sequência Negativa</i>							
Sudeste				Sul			
Probabilidade de máximos (cenários < histórico)				Probabilidade de máximos (cenários < histórico)			
Comprimento	Intensidade	Soma	Valor médio	Comprimento	Intensidade	Soma	Valor médio
90	97	86	86	93	95	77	76
Nordeste				Norte			
Probabilidade de máximos (cenários < histórico)				Probabilidade de máximos (cenários < histórico)			
Comprimento	Intensidade	Soma	Valor médio	Comprimento	Intensidade	Soma	Valor médio
95	92	89	88	99	98	96	96

Observa-se que o modelo proposto consegue reproduzir, em suas séries simuladas, com boa qualidade, os períodos de afluições baixas.

4.3.1.7

Análise de Sequência Positiva

É análogo à sequência negativa, porém, neste caso, analisa-se o período de tempo que as vazões afluentes estão acima dos valores predeterminados, ou seja, representa a capacidade de reprodução dos períodos de cheia. Os valores de interesse (comprimento de sequência, soma de sequência e intensidade de sequência) são equivalentes ao critério anterior. Os resultados para essa análise são apresentados na tabela 19.

Observa-se que o modelo proposto consegue reproduzir, com exceção do subsistema Nordeste, os períodos de afluições altas. Pode-se avaliar com esse resultado que tal característica ocorre devido ao subsistema nordeste apresentar de forma geral um comportamento de afluições baixo. De maneira geral, o modelo ajustado para essa região tende a representar séries com características de baixa afluição com melhor qualidade.

Tabela 19: Resultados da Análise de Sequência Positiva em valores percentuais.

<i>Sequência Positiva</i>							
Sudeste				Sul			
Probabilidade de máximos (cenários > histórico)				Probabilidade de máximos (cenários > histórico)			
Comprimento	Intensidade	Soma	Valor médio	Comprimento	Intensidade	Soma	Valor médio
92	97	98	91	91	88	90	99
Nordeste				Norte			
Probabilidade de máximos (cenários > histórico)				Probabilidade de máximos (cenários > histórico)			
Comprimento	Intensidade	Soma	Valor médio	Comprimento	Intensidade	Soma	Valor médio
46	66	18	89	99	82	94	93

4.3.1.8

Análise de Correlação Cruzada

A análise de correlação cruzada, da maneira que é utilizada nesta tese, foi proposta em (BALDIOTI, 2014). A análise de correlação cruzada tem por objetivo avaliar como os regimes hidrológicos estão espacialmente correlacionados. Dessa forma, as séries sintéticas devem acompanhar a correlação histórica. Foram gerados gráficos Box-Plot dos cenários sintéticos para que seja avaliado se a correlação histórica está entre o primeiro e o terceiro quartil. Como a avaliação é feita por subsistema, o valor de interesse será a quantidade de correlações que respeitam essa premissa. Destarte será dado uma nota de 0 a 3 por subsistema, uma vez que com quatro subsistemas tem-se no máximo três correlações dentro dos quartis de interesse.

Deste modo, segue na figura 15 os Box-Plot para as correlações entre os subsistemas, onde em verde é mostrado o valor da correlação histórica.

A partir da métrica apresentada acima, que será utilizada para avaliação do modelo multicritério, tem-se seguintes valores para os subsistemas:

- 1) Sudeste: 2 (duas correlações entre os quartis).
- 2) Sul: 1 (uma correlação entre os quartis).
- 3) Nordeste: 2 (duas correlações entre os quartis).
- 4) Norte: 3 (três correlações entre os quartis).

Figura 15: Box-Plot das correlações cruzadas entre os subsistemas.

4.3.1.9

Análise dos Resíduos

A análise dos resíduos tem como objetivo verificar se o modelo foi bem ajustado, sendo assim, avalia-se a média (através do teste-t), a heterocedasticidade condicional (através do teste ARCH) e, por fim, se as autocorrelações são diferentes de zero, ou seja, se os dados são independentemente distribuídos (através do teste de LJUNG-BOX).

Os resultados para esses testes, por subsistema, são apresentados na tabela 20.

Tabela 20: Análise dos Resíduos.

	teste-t	ARCH	LJUNG-BOX
Sudeste	0,0000	0,9500	0,9500
Sul	0,0000	0,9667	0,8667
Nordeste	0,0000	0,9250	0,9250
Norte	0,0000	0,9250	0,9083

A partir dos resultados expostos anteriormente pode-se destacar alguns pontos importantes:

- O teste-t avalia se os resíduos seguem uma normal com média zero. Observando os resultados, onde nenhum subsistema aceita a hipótese nula, e lembrando que uma das considerações do modelo multiplicativo é que $E[a_t] = 1$, tem-se que o comportamento dos resíduos segue o esperado;
- O teste ARCH avalia a hipótese nula de que a série de resíduos não apresenta heterocedasticidade condicional, ou seja, a partir dos resultados pode-se dizer que as séries não apresentam tal característica;
- Por fim, o teste de LJUNG-BOX, que testa sob a hipótese nula se os dados são independentes, aponta que os resíduos apresentam tal característica com uma boa margem.

4.3.2

Análise Multicritério com Viés

No presente estudo os especialistas são agrupados pelas áreas de atuação, pois parte-se da hipótese que os interesses destes indivíduos estão diretamente vinculados aos interesses dos setores nos quais estão inseridos.

De forma genérica, esse agrupamento de especialistas, também denominado nesse texto por comitê de especialistas ou cluster de especialistas, pode ser realizado no momento da captura das respostas destes indivíduos. Esse mecanismo pode ser realizado através da inclusão de uma proxy no formulário de coleta das respostas, de forma a permitir a estes agentes responder a quais grupos

pertencem, ou seja, a partir de grupos pré-determinados no formulário, o indivíduo deverá identificar a qual ele pertence.

Uma vez que os grupos são definidos, computa-se as soluções locais correspondente aos pesos de cada cluster. Tais soluções são obtidas utilizando o método da média geométrica e passam a receber a denominação de centroide, em referência aos métodos de clusterização. A partir da abordagem AHP, a ordenação final é calculada para cada um dos comitês e então comparada com a solução global.

Resumindo, a metodologia aplicada consiste em pré-identificar os grupos mediante informações prévias sobre interesses e objetivos comuns e na etapa de pós-análise calcular os centroides de cada agrupamento a partir da média geométrica dos vetores de pesos. No passo final são equalizadas as distâncias entre a ordenação principal (solução global obtida pela aplicação da metodologia AHP original) e as soluções locais de cada cluster, ou seja, por meio da aplicação do conceito do campo de viés é identificado qual centroide possui menor distância da solução global (G_0) e através dessa menor distância são recalculados os demais centroides para que todos fiquem equidistantes de G_0 . Com isso, garante-se que todas essas novas soluções locais sejam equivalentes.

O estudo de caso escolhido para aplicação dessa nova metodologia foi a classificação dos modelos de simulação de ENA. O objetivo é determinar o melhor modelo (alternativa) para ser utilizado na etapa de otimização via programação dinâmica dual estocástica, na qual é calculado o preço da energia. De outra maneira, o objetivo é escolher o modelo que produza os melhores cenários, atendendo as necessidades específicas dos comitês de especialistas, de acordo com suas preferências reveladas.

Estes grupos são: Indústria, Órgão Regulador e Academia. Pressupõe-se que cada agrupamento possui interesses específicos na avaliação dos cenários de previsão gerados. Por exemplo, para a indústria supõe-se que esta prefira cenários que possuam menor variabilidade, para que ela possa prever o futuro com menor incerteza, maximizando os lucros. Já para o órgão regulador postula-se que este tenha preferência por cenários nos quais o déficit seja mínimo, pois atenderá melhor a população. Por fim, para a academia formula-se a hipótese de esta prefira cenários que representem bem todas as características (momentos) das séries históricas, com o intuito de validar a robustez dos modelos.

4.3.2.1

Estrutura Multicritério

Será apresentado nessa seção a estrutura do AHP utilizada, sua hierarquia e a matriz de decisão final para o estudo de caso proposto.

Para facilitar o entendimento da estrutura hierárquica, a mesma será apresentada em duas etapas, primeiramente tem-se a estrutura básica, composta por quatro níveis: objetivo; critérios; subcritérios; alternativas. Posteriormente expande-se tal estrutura de forma a englobar os quatro subsistemas. Para reduzir a quantidade de comparações pareadas dividiu-se os atributos em critérios e subcritérios. Dessa forma, tem-se a seguinte estrutura básica:

I. Objetivo:

Ordenar os Modelos Selecionados

II. Critérios:

Estatísticas Básicas de Aderência dos Cenários (EBAC)

Análise de Sequência Negativa (ASN)

Análise de Sequência Positiva (ASP)

Análise de Correlação Cruzada (ACC)

Análise dos Resíduos dos Modelos (ARM)

III. Subcritérios:

Teste de Média (*t-test*)

Teste de Variância (Levene)

Teste de Aderência (Kolmogorov-Sminorv)

Teste de Mediana (Wilcoxon)

Análise de Assimetria

Comprimento de Sequência Negativa

Soma de Sequência Negativa

Intensidade de Sequência Negativa

Representação de Máximos de Sequência Negativa

Comprimento de Sequência Positiva

Soma de Sequência Positiva

Intensidade de Sequência Positiva

Análise de Correlação Cruzada

Teste de Média nos Ruídos (*t-test*)

Teste ARCH

Teste de LJUNG-BOX

IV. Alternativas:

PAR(p) – LogNormal

PAR(p) – Bootstrap

PAR(p) – Bootstrap Monte Carlo

PAR(p) – Multiplicativo

PAR(p) – MCMC

A partir do exposto, tem-se na figura 16 a estrutura hierárquica básica e na figura 17 a estrutura hierárquica expandida final. Não é necessário julgamento para definição dos pesos referentes aos subsistemas, uma vez que se entende que a importância relativa de cada um é definida pela projeção do consumo de energia elétrica de cada região, apresentada na seção 4.1.

Figura 16: Estrutura hierárquica básica.

Figura 17: Estrutura hierárquica expandida.

Uma vez definida a estrutura a ser utilizada, define-se a matriz de decisão para o cálculo do vetor de prioridades final. Tal cálculo é realizado a partir agregação do vetor de prioridades dos subsistemas (w_{subs}) e das alternativas (w_a). A matriz de decisão é exibida na figura 18.

Figura 18: Matriz de Decisão (BALDIOTI, 2014).

4.3.2.2

Pré-Análise

Ao todo, nove especialistas foram consultados, três ligados ao ONS, três oriundos da indústria geradora de energia elétrica e três advindos da academia. Estes especialistas foram divididos em três comitês de acordo com a área em que atuam, sendo o primeiro grupo denominado órgão regulador, o segundo, indústria, e o terceiro, academia. Portanto, como tais agrupamentos foram definidos previamente em função da área de atuação de cada especialista, uma vez que já é sabido a priori o campo de atuação de todos os colaboradores. Assim, é apresentado na tabela 21 a divisão por grupo dos especialistas.

Tabela 21: Cluster dos Especialistas.

Indústria	Academia	Órgão Regulador
E1	E2	E4
E3	E6	E5
E9	E8	E7

Desta forma, identificado os comitês de especialistas, aplica-se o método AHP original para o cálculo do vetor de prioridades conjunta, conforme será mostrado a seguir.

4.3.2.3

Análise Multicritério

Nesta etapa, básica do AHP, calculam-se os pesos de todas as alternativas e em seguida a ordenação final do modelo, utilizando a média geométrica, como indicado no capítulo 2.

Primeiramente tem-se o vetor de prioridades dos subsistemas, definido na seção 4.1, tabela 15, a partir da projeção do consumo de energia elétrica para o ano de 2017, tal vetor pode ser visto na tabela 22 abaixo.

Tabela 22: Vetor de Prioridades dos Subsistema.

Subsistema	w_{subs}
SE/CO (1)	0,5865
S (2)	0,1796
NE (3)	0,1578
N (4)	0,0762

Para a síntese dos julgamentos par a par, os especialistas realizaram através do preenchimento de um formulário, 32 comparações a partir da hierarquia da figura 17, simplificando a quantidade de julgamentos necessários, uma vez que se tem muitos critérios em função dos testes estatísticos propostos para padronização da análise. Os julgamentos individuais dos especialistas são apresentados no Apêndice I, onde é possível verificar que tais julgamentos são consistentes e seguem a regra da razão de consistência (RC) proposta em (BALDIOTI, 2014), conforme apresentado na seção 2.3.2.

A seguir será apresentado o vetor de pesos agregados dos atributos (w_c), o qual é calculado a partir dos pesos gerados por cada um dos especialistas, para cada atributo. Vale lembrar que para agregar os julgamentos de vários especialistas, de acordo com a metodologia AHP, é necessário calcular a média geométrica de cada elemento dos vetores de pesos, gerando assim um único vetor que contenha o valor representativo de todos os julgamentos. A tabela 23 apresenta o vetor de pesos finais dos critérios (w_c).

Tabela 23: Vetor de prioridades final principal.

Atributos	Peso Final (w_c)
Média	0,11838
Variância	0,07980
Assimetria	0,07218
Mediana	0,04762
Aderência	0,11376
Comprimento de SN	0,04878
Soma de SN	0,04601
Intensidade de SN	0,05068
Representação de Máximos	0,04578
Comprimento de SP	0,02825
Soma de SP	0,02920
Intensidade de SP	0,03641
Correlação Cruzada	0,14140
Média dos Resíduos	0,05146
ARCH	0,03318
LJUNG-BOX	0,05712

A tabela 24 a seguir apresenta os valores de interesse utilizados como resultados.

Tabela 24: Valores de interesse dos atributos de desempenho (BALDIOTI, 2014).

Critério de Desempenho	Valor de Interesse
Teste de Média	Porcentagem dos aprovados por período
Teste de Variância	Porcentagem dos aprovados por período
Teste de Aderência	Porcentagem dos aprovados por período
Teste de Mediana	Porcentagem dos aprovados por período
Análise de Assimetria	Porcentagem dos aprovados pelo critério de decisão por período
Comprimento de Sequência	Valor normalizado do comprimento
Soma de Sequência	Valor normalizado da soma
Intensidade de Sequência	Valor normalizado da intensidade
Representação de Máximos	Probabilidade de que a pior Intensidade de Sequência Negativa Máxima nos cenários gerados seja pior que a pior do histórico
Análise de Correlação Cruzada	Quantidade de correlações históricas dos subsistemas que estão entre o 1º e 3º quartil definido pelo Box-Plot da correlação dos cenários (número entre 0 e 3)
Teste de média dos Resíduos	Porcentagem dos aprovados por período
Teste ARCH	Porcentagem dos aprovados por período
Teste LJUNG-BOX	Porcentagem dos aprovados por período

De posse dos resultados dos testes, o procedimento seguinte a ser realizado é a normalização destes valores. Na tabela 25 esses valores são apresentados por subsistema e por modelo.

Tabela 25: Valor das alternativas normalizadas.

SE/CO - Subs 1																
	Média	Variância	Assimetria	Mediana	Aderência	CSN	SSN	ISN	RM	CSP	SSP	ISP	CC	Média R	ARCH	L-B
PAR(p) - Lognormal	0,1533	0,1938	0,1007	0,1509	0,1563	0,1973	0,1889	0,1979	0,1873	0,1972	0,1992	0,2020	0,2727	0,1697	0,1983	0,1986
PAR(p) - Bootstrap	0,1800	0,1876	0,1439	0,1734	0,1786	0,1952	0,2107	0,2112	0,2117	0,2041	0,2012	0,2020	0,1818	0,1576	0,2052	0,1968
PAR(p) - Bootstrap-MC	0,2222	0,2062	0,1295	0,2252	0,2232	0,2040	0,1889	0,1791	0,1873	0,1972	0,2033	0,2020	0,1818	0,3303	0,2000	0,2004
PAR(p) - Multiplicativo	0,2222	0,2062	0,5396	0,2252	0,2232	0,2017	0,2082	0,2594	0,2092	0,2110	0,2012	0,1960	0,1818	0,0000	0,1983	0,2039
PAR(p) - MCMC	0,2222	0,2062	0,0863	0,2252	0,2188	0,2017	0,2034	0,1524	0,2044	0,1904	0,1951	0,1980	0,1818	0,3424	0,1983	0,2004

S - Subs 2																
	Média	Variância	Assimetria	Mediana	Aderência	CSN	SSN	ISN	RM	CSP	SSP	ISP	CC	Média R	ARCH	L-B
PAR(p) - Lognormal	0,1663	0,2050	0,1639	0,1644	0,1589	0,1966	0,1980	0,1929	0,1995	0,1897	0,1979	0,2033	0,3000	0,1415	0,1969	0,1924
PAR(p) - Bootstrap	0,1685	0,1862	0,0984	0,1621	0,1589	0,2074	0,2104	0,1882	0,2120	0,1964	0,2042	0,2075	0,2000	0,1635	0,2021	0,2051
PAR(p) - Bootstrap-MC	0,2217	0,1987	0,2295	0,2192	0,2200	0,1966	0,2054	0,2165	0,2020	0,2009	0,2042	0,2054	0,2000	0,3459	0,1969	0,2069
PAR(p) - Multiplicativo	0,2217	0,2029	0,4098	0,2283	0,2421	0,2029	0,1906	0,2235	0,1895	0,2031	0,1895	0,1826	0,1000	0,0000	0,2004	0,1888
PAR(p) - MCMC	0,2217	0,2071	0,0984	0,2260	0,2200	0,1966	0,1955	0,1788	0,1970	0,2098	0,2042	0,2012	0,2000	0,3491	0,2038	0,2069

NE - Subs 3																
	Média	Variância	Assimetria	Mediana	Aderência	CSN	SSN	ISN	RM	CSP	SSP	ISP	CC	Média R	ARCH	L-B
PAR(p) - Lognormal	0,1667	0,1820	0,1515	0,1679	0,1737	0,2016	0,2022	0,2173	0,2014	0,2160	0,6434	0,0687	0,3000	0,1631	0,2007	0,1946
PAR(p) - Bootstrap	0,1786	0,1711	0,1894	0,1799	0,1878	0,1955	0,2000	0,1869	0,2014	0,1914	0,0853	0,2234	0,1000	0,1692	0,2042	0,2036
PAR(p) - Bootstrap-MC	0,2381	0,2193	0,2879	0,2398	0,2347	0,2016	0,2045	0,1893	0,2036	0,2037	0,1085	0,2577	0,3000	0,3477	0,1954	0,1982
PAR(p) - Multiplicativo	0,2381	0,2193	0,2121	0,2398	0,2300	0,2058	0,2000	0,2150	0,1991	0,2840	0,1395	0,2268	0,2000	0,0000	0,1954	0,2000
PAR(p) - MCMC	0,1786	0,2083	0,1591	0,1727	0,1737	0,1955	0,1933	0,1916	0,1946	0,1049	0,0233	0,2234	0,1000	0,3200	0,2042	0,2036

N - Subs 4																
	Média	Variância	Assimetria	Mediana	Aderência	CSN	SSN	ISN	RM	CSP	SSP	ISP	CC	Média R	ARCH	L-B
PAR(p) - Lognormal	0,1583	0,1922	0,1368	0,1567	0,1496	0,1996	0,1924	0,2117	0,1924	0,1992	0,1988	0,2017	0,2000	0,1553	0,1990	0,2021
PAR(p) - Bootstrap	0,1768	0,1793	0,2316	0,1795	0,1906	0,1996	0,1991	0,1786	0,1991	0,1992	0,2008	0,2102	0,2000	0,1586	0,2007	0,2004
PAR(p) - Bootstrap-MC	0,1398	0,2052	0,2579	0,0997	0,1085	0,1996	0,1969	0,2015	0,1969	0,1992	0,2029	0,2038	0,2000	0,3204	0,2024	0,2039
PAR(p) - Multiplicativo	0,2612	0,2117	0,1579	0,2821	0,2757	0,2016	0,2148	0,2500	0,2148	0,2012	0,1946	0,1741	0,2000	0,0000	0,1920	0,1916
PAR(p) - MCMC	0,2639	0,2117	0,2158	0,2821	0,2757	0,1996	0,1969	0,1582	0,1969	0,2012	0,2029	0,2102	0,2000	0,3657	0,2059	0,2021

Para gerar a matriz de peso final w_f multiplica-se cada valor da tabela 25 pelo peso de seu respectivo subsistema (w_{subs}), apresentado na tabela 22. Após essa multiplicação, soma-se as quatro matrizes dos subsistemas. Com isso obtém-se uma nova matriz contendo um único peso para cada par de atributo e modelo, a qual passa a ser denominada matriz de peso final w_f .

Para encontrar a ordenação final dos modelos multiplica-se a matriz de peso final w_f pelo vetor de desempenho das alternativas em relação aos critérios w_c . Formalizando matricialmente, tem-se:

$$F = w_f \cdot w_c \quad (18)$$

Como w_f é uma matriz de ordem 5×16 e w_c tem ordem 16×1 , essa multiplicação irá gerar uma matriz de ordem 5×1 . Matematicamente pode-se escrever também:

$$F(a) = \sum_{j=1}^n w_{f_{aj}} w_{c_j} \quad (19)$$

Onde:

$F(a)$ é o valor final de alternativa a .

$w_{f_{aj}}$ é o desempenho da alternativa a no j -ésimo critério;

w_{c_j} é o peso do j -ésimo critério.

Aplicando os passos apresentados, tem-se a ordenação final principal, dada pela matriz F , como se segue:

Tabela 26: Ordenação final principal das Alternativas.

Alternativa	F	Ordem
PAR(p) – Lognormal	0,19147	4º
PAR(p) – Bootstrap	0,18341	5º
PAR(p) – Bootstrap-MC	0,21081	2º
PAR(p) – Multiplicativo	0,21458	1º
PAR(p) – MCMC	0,19973	3º

Observa-se nesse resultado o modelo PAR(p) – Multiplicativo apresentou o maior índice. A partir disso é seguro afirmar que este modelo é o que melhor representa as preferências conjuntas de todos os especialistas, ou seja, diante dos testes aplicados, este foi o modelo que obteve os melhores resultados nos itens ressaltados como mais importantes pelo conjunto de especialistas. É válido destacar que tal opção não deve ser interpretada como a solução ótima, mas sim como uma solução de compromisso entre as partes.

4.3.3

Análise das preferências reveladas

Esta é a etapa fundamental da metodologia proposta, também referida ao longo do texto como pós-análise. Serão apresentadas as soluções locais para cada comitê de especialistas, calculadas a partir da média geométrica.

Uma vez definido os três grupos, como exposto na tabela 27 a seguir, são calculados os centróides referentes a cada um deles. São apresentados na tabela 28 os novos pesos calculados utilizando essa norma.

Tabela 27: Soluções locais (centroides) dos comitês de especialistas.

Atributos	Academia	Indústria	Regulação	Solução Global
Média	0,14927	0,08787	0,09357	0,11023
Variância	0,07067	0,11410	0,04893	0,07790
Assimetria	0,06703	0,09243	0,05940	0,07296
Mediana	0,05337	0,04297	0,04123	0,04586
Aderência	0,14113	0,08003	0,09443	0,10520
Comprimento de SN	0,06667	0,03787	0,04143	0,04866
Soma de SN	0,04630	0,03470	0,05057	0,04386
Intensidade de SN	0,04150	0,04767	0,06597	0,05171
Representação de Máximos	0,05133	0,03917	0,04323	0,04458
Comprimento de SP	0,04003	0,03063	0,01967	0,03011
Soma de SP	0,04307	0,02680	0,02957	0,03314
Intensidade de SP	0,04613	0,03513	0,02383	0,03503
Correlação Cruzada	0,09287	0,21723	0,10123	0,13711
Média dos Resíduos	0,03780	0,03147	0,12047	0,06324
LRCH	0,01533	0,02780	0,06397	0,03570
JUNG-BOX	0,03753	0,05413	0,10237	0,06468

4.3.3.1

Avaliação dos pressupostos sobre os 3 agrupamentos

Conforme pressuposto na seção 4.3.2, era esperado que os especialistas vinculados à academia revelassem suas preferências por critérios capazes de avaliar quais cenários possuem a capacidade de melhor representar os momentos das séries históricas. Observando a tabela 27 verifica-se que os dois critérios mais relevantes para esse comitê, destacados em verde e em amarelo, foram os testes de média e de aderência, critérios estes que favorecem de fato a representatividade dos momentos, corroborando de fato a suposição feita.

Em relação à indústria, a hipótese apresentada afirmava que tal comitê de especialistas revelaria suas preferências por critérios relacionados à capacidade dos cenários gerados em replicar a variância da série histórica e entre os dois

critérios mais relevantes para esse comitê, destaca-se o teste de variância, validando desta forma a hipótese feita.

Para o órgão regulador conjecturou-se que este tivesse preferência por atributos capazes de identificar cenários nos quais o déficit de energia fosse mínimo, porém, os critérios revelados mais importantes para esse comitê foram o teste de média dos resíduos e o teste de LJUNG-BOX. Portanto, a preferência revelada para esse comitê divergiu da hipótese postulada.

4.3.3.2

Classificação final

A partir dos centroides calculados é possível construir o campo de viés através da menor distância entre a solução global (G_0) e as soluções locais de cada cluster. Estas distâncias foram denominadas pelo autor como viés de preferências. Assim, tem-se, a partir dos dados resumidos na tabela 28, que o campo de viés será determinado pelo viés de preferência do agrupamento indústria, uma vez que este é o de menor dimensão.

Tabela 28: Distância entre o centro e os clusters.

Comitê	Viés de preferências
Academia	0,01186
Indústria	0,00847
Regulador	0,01043

Uma vez identificado o campo de viés, faz-se o ajuste das soluções locais para que estas passem a estar contidas neste campo. Este ajuste se dá através do cálculo do Giv_{min} apresentado na sessão 3.3, o qual determina a interseção dos vieses de preferência com o campo de viés. Esse passo final é fundamental para garantir a equidade das soluções encontradas.

Na tabela 29 são apresentadas as classificações dos cinco diferentes modelos geradores de cenários estocásticos, tanto para a solução global quanto para os comitês de especialistas da Academia, Indústria e Órgão Regulador. As alternativas em verde destacam os modelos melhores classificados, amarelo se

referem às alternativas em segunda colocação, por fim, as alternativas em terceira posição estão em vermelho.

Tabela 29: Ordenação das alternativas após equalização no campo de viés.

Alternativas	AHP	Academia	Indústria	Regulador
Lognormal	0,19147	0,18669	0,19883	0,18922
Bootstrap	0,18341	0,18372	0,18200	0,18391
Boot-MC	0,21081	0,20990	0,20677	0,22023
Multiplicativo	0,21458	0,21924	0,22065	0,19445
MCMC	0,19973	0,20045	0,19174	0,21220

4.3.3.3

Discussão sobre o resultado

Percebe-se que a ordenação sofre uma alteração em relação ao método AHP tradicional para o comitê que representa o Órgão Regulador. Os agrupamentos Academia e Indústria apresentam comportamentos equivalentes. Fica evidente, a partir dos resultados, que esses dois grupos apresentam concordância no que diz respeito à modelagem a ser utilizada para geração de cenários sintéticos de ENA. Pode-se dizer que tal concordância é esperada, uma vez que os objetivos em relação a qualidade e representatividade dos modelos é almejada por ambos, enquanto o órgão regulador se interessa prioritariamente com a questão do abastecimento energético.

Conclusões e Trabalhos futuros

A contribuição deste trabalho foi a proposição de uma extensão da metodologia AHP para torná-la apta a revelar preferências de comitês de especialistas e, a partir destas preferências, identificar múltiplas soluções viáveis, atendendo dessa forma interesses peculiares destes comitês, os quais estão envolvidos no processo de tomada de decisão.

A aplicação dessa metodologia proposta no problema de seleção de modelos geradores de cenários estocásticos, a serem utilizados no planejamento da operação de médio prazo do sistema hidrotérmico brasileiro, mostrou que ao segmentar os especialistas consultados em comitês, agrupando eles conforme setor em que atuam, é possível revelar as preferências vinculadas a estes setores. A partir destas preferências foi possível verificar que conjecturas feitas sobre segmentos do SIN são verdadeiras ou não.

Para o segmento da Academia observou-se que as preferências reveladas foram capazes de corroborar a conjectura de interesse por representação dos momentos, e para a Indústria a hipótese de preferência por representação da variância. Porém, para o Órgão Regulador, a hipótese feita sobre predileção por representatividade de déficit não pode ser verificada.

Estas preferências reveladas juntamente com a metodologia proposta permitiu, a partir dos resultados do método AHP, produzir soluções derivadas da solução original. Para cada comitê foi possível encontrar uma nova ordenação de modelos que atendesse de forma mais adequada aos interesses deste comitê e ao mesmo tempo se mantivesse coerente com a ordenação proposta na solução original. Dentre os três comitês, os modelos melhor ordenado para a Academia e para a Indústria coincidiram com a solução, indicando o modelo PAR(p) multiplicativo, já para o Órgão Regulador o modelo melhor classificado foi o PAR(p) Boot-MC.

Para desenvolvimentos futuros sugere-se investigar o comportamento do processo de otimização a partir dos cenários gerados pelo modelo PAR(p) multiplicativo. Outro ponto a avançar é a expansão da análise multicritério para o

contexto da otimização, de forma a gerar um modelo que englobe todo processo de planejamento de médio/longo prazo do setor elétrico. Além disso, como há diversas variáveis de saída no processo de otimização, tais como períodos de déficit e preço de energia, poderiam ser incluídos neste estudo diferentes grupos de agentes representando setores como consumidores de grande porte e distribuidores de energia.

É importante ressaltar que o desenvolvimento aqui apresentado faz parte de uma das etapas do P&D estratégico intitulado “Modelos de Otimização do Despacho Hidrotérmico”. Os resultados são frutos da continuação do desenvolvimento da análise multicritério no contexto do despacho hidrotérmico e aponta novas diretrizes para futuros estudos sobre o tema.

Referências

- ACZÉL, J. & SAATY, T.L. 1983. Procedures for Synthesizing Ratio Judgments. *Journal of Mathematical Psychology*, Março, pp. 93-102.
- AGUARÓN, J.; ESCOBAR, M.T. & MORENO-JIMÉNEZ, J.M. 2016. The precise consistency consensus matrix in a local AHP-group decision making context. *Annals of Operations Research*, Volume 245, pp. 245-259.
- ALMEIDA, A.; ELLIAN, S. & NOBRE, J. 2008. Modificações e alternativas aos testes de Levene e de Brown e Forsythe para igualdade de variâncias e médias. *Revista Colombiana de Estatística*, 31(2), pp. 241-260.
- ALONSO, J.A. & LAMATA, M.T. 2005. A Statistical Criterion of Consistency in the Analytic Hierarchy Process. *Modeling Decisions for Artificial Intelligence*, Volume 3558, pp. 67-76.
- ALONSO, J.A. & LAMATA, M.T. 2006. Consistency in the Analytic Hierarchy Process: A New Approach. *International Journal of Uncertainty*, 14(4), pp. 445-459.
- BALDIOTI, H.R. 2014. *Abordagem Multicritério para Avaliação de Modelos Geradores de Cenários Aplicados ao Planejamento da Operação Hidrotérmica de Médio Prazo*. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro: Brasil.
- BERNASCONI, M. CHOIRAT, C. & SERI, R. 2014. Empirical properties of group preference aggregation methods employed in AHP: Theory and evidence. *European Journal of Operational Research*, Vol. 232, pp. 584-592.
- BOLLOJU, N. 2001. Aggregation of analytic hierarchy process models based on similarities in decision makers' preferences. *European Journal of Operational Research*, Vol. 128, pp. 499-508.
- BOX, G.E.P. & PIERCE, D.A. 1970. Distribution of Residual Autocorrelations in Autoregressive-Integrated Moving Average Time Series Models. *Journal of the American Statistical Association*, Volume 65, pp. 1509-1526.
- BYUN, D.-H., 2001. The AHP approach for selecting an automobile purchase model. *Information & Management*, 38(5), pp. 289-297.
- CABRAL, F.G. 2016. *Uma proposta de um modelo periódico multivariado autorregressivo multiplicativo para geração de cenários de afluência aplicável ao modelo de planejamento do setor elétrico brasileiro*. Dissertação de Mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro: Brasil.

CAMPOS, V.R. 2011. *Modelo de Apoio à Decisão Multicritério para Priorização de Projetos em Saneamento*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo: Brasil.

CASELA, G. & BERGER, R.L. 2001. *Statistical Inference*. 2nd ed. Belmont: Duxbury.

CASTRO, C.M.B. 2012. *Planejamento Energético da Operação de Médio Prazo Conjugando as Técnicas de PDDE, PAR(p) e Bootstrap*. Juiz de Fora: Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora.

CEPEL, 2015. *NEWAVE - Modelo de Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos Interligados de Longo e Médio Prazo*. [Online] Available at: <http://www.cepel.br/produtos/newave-modelo-de-planejamento-da-operacao-de-sistemas-hidrotermicos-interligados-de-longo-e-medio-prazo.htm> [Acesso em 12 fevereiro 2017].

CLEMEN, R.T. & REILLY, T. 2004. *Making Hard Decisions with DecisionTools*. 2nd ed. Pacific Grove: Duxbury.

CONDON, E.; GOLDEN, B. & WASIL, E. 2003. Visualizing group decisions in the analytic hierarchy process. *Computer & Operations Research*, Volume 30, pp. 1435-1445.

CONOVER, W.U. 1971. *Practical Nonparametric Statistics*. New York: John Wiley & Sons.

DONEGAN, H.A. & DODD, F.J. 1991. A note on Saaty's Random Indexes. *Mathematical Computer Modelling*, 15(10), pp. 135-137.

DONG, Q. & COOPER, O. 2016. A peer-to-peer dynamic adaptive consensus reaching model for the group AHP decision making. *European Journal of Operational Research*, Volume 250, pp. 521-230.

DYER, J.S. 1990. Remarks on the Analytic Hierarchy Process. *Journal of The Institute of Management Science*, 36(3), pp. 249-258.

ENGLE, R.F. 1982. Autoregressive Conditional Heteroskedasticity with Estimates of the Variance of United Kingdom Inflation. *Econometrica*, Vol. 50, pp. 987-1007.

ERGU, D.; KOU, G.; PENG, Y. & YANG, X. 2014. Simulation Experiments for Improving the Consistency Ratio of Reciprocal Matrices. *International Journal of Computers Communications & Control*, 9(4), pp. 408-418.

ESCOBAR, M.T. & MORENO-JIMÉNEZ, J.M. 2007. Aggregation of Individual Preference Structures in Ahp-Group Decision Making. *Group Decision and Negotiation*, Vol. 16, pp. 287-301.

FERNANDES, J.E.D.M. 2009. *Seleção de uma Aeronave para Atividades de Charter Regional: Uma Abordagem Multicritério Baseada no Método NAIADE*. Dissertação de Mestrado, IBMEC, Rio de Janeiro: Brasil.

FERREIRA, P.G.C. 2013. *A estocasticidade associada ao Setor Elétrico Brasileiro e uma nova abordagem para a geração de afluências via Modelos Periódicos Gama*. Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro: Brasil.

FORMAN, E. & PENIWATI, K., 1998. Aggregating individual judgments and priorities with the Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*, Vol. 108, pp. 165-169.

GOMES, L.F.A.M. 2003. Avaliações de estratégias com múltiplos critérios: porque o método AHP deve continuar a ser usado. *Visão estratégica*, Vol. 1, p. 22.

GOMES, L.F.A.M. 2007. *Teoria da Decisão*. São Paulo: Thompson.

GOMES, L.F.A.M. & GOMES, C. F. S., 2012. *Tomada de Decisão Gerencial: Enfoque Multicritério*. 4ª ed. São Paulo: Atlas.

GOMES, L.F.A.M.; MACHADO, M.A.S. & RANGEL, L.A.D., 2015. The Multiple Choice Problem with Interactions Between Criteria. *Pesquisa Operacional*, 35(3), pp. 523-537.

GONZÁLEZ-PACHÓN, J. & ROMERO, C. 2007. Inferring consensus weights from pairwise comparison matrices without suitable properties. *Annals of Operational Research*, Vol. 154, pp. 123-132.

GOODWIN, P. & WRIGHT, G., 2010. *Decision Analysis for Management Judgment: Fourth Edition*. 4ª ed. Chichester: John Wiley & Sons.

HARKER, P. & VARGAS, L. G., 1990. Reply to 'Remarks on the Analytic Hierarchy Process' by J. S. Dyer. *Journal of The Institute of Management Science*, 36(3), pp. 269-273.

HIPEL, K. W. & MCLEOD, A. I., 1994. *Time Series Modelling of Water Resources and Environmental Systems*. Amsterdam: The Netherlands Elsevier.

HOURLIEH, A., 2013. *Scaled Lp Norm and Geometric Mean*. [Online] Available at: <http://math.stackexchange.com/questions/282271/scaled-lp-norm-and-geometric-mean> [Acesso em 10 01 2017].

ISHIZAKA, A. & LABID, A., 2011. Review of the main developments in the analytic hierarchy process. *Expert Systems with Applications*, Volume 38, pp. 14336-14345.

KEENEY, R. L., 2013. Foundations for Group Decision Analysis. *Decision Analysis. Articles in Advance*, 10(2), pp. 103-120.

KOCZKODAJ, W. et al., 2016. Important Facts and Observations about Pairwise Comparisons (the special issue edition). *Fundamenta Informaticae XX*, 144(3-4), pp. 291-307.

KOU, G., ERGU, D. & SHANG, J., 2014. Enhancing data consistency in decision matrix: Adapting Hadamard model to mitigate judgment contradiction. *European Journal of Operational Research*, Volume 236, pp. 261-271.

LIN, S.-W., WU, C.-G. & LU, M.-T., 2010. *Decomposition of variation in experts' judgments in the analytic hierarchy process*. CIE: 40th International Conference on Computers and Industrial Engineering.

LJUNG, G. M. & BOX, G. E. P., 1978. On a measure of Lack of Fit in Time Series Models. *Biometrika*, Volume 65, pp. 297-303.

MACEIRA, M. E. P. & BEZERRA, C. V., 1997. *Stochastic Streamflow model for Hydroelectric*. Vancouver, Canada, 5th Int. Conf. on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS).

MA, L.-C., 2010. Visualizing preferences on spheres for group decisions based on multiplicative preference relations. *European Journal of Operational Research*, Volume 203, p. 176–184.

MANN, H. B. & WHITNEY, D. R., 1947. On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other. *Annals of Mathematical Statistics*, 18(1), pp. 50-60.

MARCATO, A. L. M., 2002. *Representação híbrida de sistemas equivalentes e individualizados para o planejamento da operação a médio prazo de sistemas de potência de grande porte*. Rio de Janeiro: Tese de Doutorado, DEE, PUC-Rio.

MCMEEKIN, C. C., 1994. *An Estimation Procedure to Detect and Remove Unintentional Judgmental Bias (UJB) in the Analytic Hierarchy Process Methodology*. s.l.:Proceedings of the 1994 IEEE International.

MEYER, C. D., 2000. *Matrix Analysis and Applied Linear Algebra*. 1 ed. Philadelphia: SIAM.

MICHAELIS, 2016. *Michaelis Moderno Dicionário da Língua Portuguesa*. [Online]

Available at: <http://michaelis.uol.com.br/busca?id=xRBKE>

MIYAGIA, Y., MIYAGIA, H. & KINJO, I., 2012. Preference Order of Categorized Group Opinions Considering Grade of Decision Makers. *Procedia Computer Science*, Volume 10, pp. 38-45.

MME, 2016. *Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro - Dezembro de 2016*. [Online] Available at: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/3308684/Boletim+de+Monitoramento+do+Sistema+El%EF%BF%BDtrico+-+Dezembro-2016.pdf/f6b5284d-4105-4b79-a030-31755664721a> [Acesso em 12 fevereiro 2017].

OLIVEIRA, F. L. C., 2010. *Nova abordagem para geração de cenários de afluências no planejamento da operação energética de médio prazo*. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro: Brasil.

OLIVEIRA, F. L. C., 2013. *Modelo de Séries Temporais para Construção de Árvores de Cenários Aplicadas à Otimização Estocástica*. Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro: Brasil.

ONS, 2017. *Operador Nacional do Sistema Elétrico*. [Online] Available at: http://www.ons.org.br/conheca_sistema/o_que_e_sin.aspx [Acesso em 12 02 2017].

OZDEMIR, M. S., 2005. Validity and inconsistency in the analytic hierarchy process. *Applied Mathematics and Computation*, Volume 161, pp. 707-720.

PASSOS, A. C., 2010. *Definição de um índice de qualidade para distribuidoras de energia elétrica utilizando o apoio multicritério à decisão e análise de séries temporais*. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro: Brasil.

PENNA, D. D. J., 2009. *Definição da Árvore de Cenários de Afluências para o Planejamento da Operação Energética de Médio Prazo*. Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro: Brasil.

PENNA, D. D. J., MACEIRA, M. E. P. & DAMÁZIO, J. M., 2011. *Selective Sampling applied to long-term*. Stockholm, Sweden, Proceedings of 17th Power Systems Computation.

PEREIRA, M. V. F., 1989. Optimal stochastic operations scheduling of large hydroelectric systems. *International Journal of Electric Power and Energy Systems*, 11(3), pp. 161-169.

RAMANATHAN, R. & GANESH, L., 1994. Group preference aggregation methods employed in AHP: An evaluation and an intrinsic process for deriving members' weightages. *European Journal of Operational Research*, Volume 79, pp. 249-265.

RIBEIRO, B. A. & BALDIOTI, H. R., 2014. *Multicriteria Approach for Evaluation of Scenarios Generation Models Applied to the Medium-Term Hydrothermal Operation Planning*. Washington, DC: Proceedings on The International Symposium on the Analytic Hierarchy Process.

SAATY, R. W., 1987. The Analytic Hierarchy Process - What it is and How it is Used. *Mathematical Modelling*, 9(3-5), pp. 161-176.

SAATY, T. L., 1977. A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures. *Journal of Mathematical Psychology*, Volume 15, pp. 234-281.

SAATY, T. L., 1991. *Método de Análise Hierárquica*. 1ª ed. São Paulo: McGraw-Hill.

SAATY, T.L. 2010. *Principia Mathematica Decernendi: Mathematical Principles of Decision Making*. 1ª ed. Pittsburgh: RWS Publications.

SAATY, T.L. 2012. *Decision Making for Leaders: The Analytic Hierarchy Process for Decisions in a Complex World*. 3ª ed. Pittsburgh: RWS Publications.

- SAATY, T.L. & PENIWATI, K., 2012. *Group Decision Making: Drawing out and Reconciling Differences*. 2^a ed. Pittsburgh: RWS Publications.
- SAATY, T.L. & VARGAS, L. G., 2007. Dispersion of group judgments. *Mathematical and Computer Modelling*, Volume 46, pp. 918-925.
- SAATY, T.L. & VARGAS, L. G., 2012. *Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process*. 2^a ed. New York: Springer.
- SALAS, J.D. & OBEYSEKERA, J. T. B., 1982. ARMA Model Identification of Hydrologic Time Series. *Water Resources Research*, Volume 18, pp. 1011-1021.
- SAMMON JR., J.W. 1969. A Nonlinear Mapping for Data Structure Analysis. *IEEE Transactions on Computers*, C-18(5), pp. 401-409.
- SOUZA, C.M.P. d., 2013. *Modelo de Previsão de Despacho de Usinas Termelétricas por meio do Método Multicritério ANP*. Dissertação de Mestrado, IBMEC, Rio de Janeiro: Brasil.
- SRDJEVIC, B., SRDJEVIC, Z., BLAGOJEVIC, B. & SUVOCAREV, K., 2013. A two-phase algorithm for consensus building in AHP-group decision making. *Applied Mathematical Modelling*, Volume 37, pp. 6670-6682.
- SSEBUGGWAWO, D., HOPPENBROUWERS, S. & PROPER, E., 2009. *Group Decision Making in Collaborative Modeling: Aggregating Individual Preferences with AHP*. EIS: Digital Proceedings of the 4th SIKS conference in Enterprise Information Systems.
- VAIDYA, O. S. & KUMAR, S., 2006. Analytic Hierarchy process: An overview of applications. *European Journal of Operational Research*, Volume 169, p. 1-29.

Apêndice I

Matrizes de Comparações Paritárias do Estudo de Caso

Serão apresentadas neste apêndice todas as matrizes recíprocas geradas a partir do julgamento dos nove especialistas (E1 à E9), bem como os autovalores máximos, os índices de consistência (IC) e as razões de consistência (RC). As matrizes serão expostas por julgamentos, ou seja, pelos atributos e por especialista. Sendo assim, seguem nas tabelas de 30 a 43 tais julgamentos.

Tabela 30: Julgamento dos Critérios.

<i>E1</i>	EBAC	ASN	ASP	ACC	ARM	Peso
EBAC	1,0000	3,0000	4,0000	2,0000	3,0000	0,4013
ASN	0,3333	1,0000	2,0000	2,0000	2,0000	0,2132
ASP	0,2500	0,5000	1,0000	0,5000	0,3333	0,0796
ACC	0,5000	0,5000	2,0000	1,0000	2,0000	0,1727
ARM	0,3333	0,5000	3,0000	0,5000	1,0000	0,1332

$$\lambda_{MAX} = 5,2437$$

$$IC = 0,0609$$

$$RC = 0,0549$$

<i>E2</i>	EBAC	ASN	ASP	ACC	ARM	Peso
EBAC	1,0000	3,0000	3,0000	5,0000	7,0000	0,4712
ASN	0,3333	1,0000	2,0000	3,0000	4,0000	0,2275
ASP	0,3333	0,5000	1,0000	3,0000	4,0000	0,1718
ACC	0,2000	0,3333	0,3333	1,0000	2,0000	0,0793
ARM	0,1429	0,2500	0,2500	0,5000	1,0000	0,0501

$$\lambda_{MAX} = 5,1282$$

$$IC = 0,0320$$

$$RC = 0,0289$$

<i>E3</i>	EBAC	ASN	ASP	ACC	ARM	Peso
EBAC	1,0000	3,0000	3,0000	3,0000	3,0000	0,4239
ASN	0,3333	1,0000	2,0000	1,0000	2,0000	0,1896
ASP	0,3333	0,5000	1,0000	1,0000	1,0000	0,1226
ACC	0,3333	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,1413
ARM	0,3333	0,5000	1,0000	1,0000	1,0000	0,1226

$$\lambda_{MAX} = 5,0776$$

$$IC = 0,0194$$

$$RC = 0,0175$$

Tabela 31: Julgamento dos critérios cont.

<i>E4</i>	EBAC	ASN	ASP	ACC	ARM	Peso
EBAC	1,0000	2,0000	5,0000	4,0000	0,5000	0,2983
ASN	0,5000	1,0000	4,0000	2,0000	0,5000	0,1839
ASP	0,2000	0,2500	1,0000	0,5000	0,2500	0,0591
ACC	0,2500	0,5000	2,0000	1,0000	0,3333	0,0978
ARM	2,0000	2,0000	4,0000	3,0000	1,0000	0,3609

$$\lambda_{MAX} = 5,1409$$

$$IC = 0,0352$$

$$RC = 0,0317$$

<i>E5</i>	EBAC	ASN	ASP	ACC	ARM	Peso
EBAC	1,0000	4,0000	4,0000	2,0000	1,0000	0,3396
ASN	0,2500	1,0000	4,0000	3,0000	1,0000	0,2027
ASP	0,2500	0,2500	1,0000	0,2500	0,2000	0,0495
ACC	0,5000	0,3333	4,0000	1,0000	0,2000	0,1101
ARM	1,0000	1,0000	5,0000	5,0000	1,0000	0,2981

$$\lambda_{MAX} = 5,4967$$

$$IC = 0,1242$$

$$RC = 0,1119$$

<i>E6</i>	EBAC	ASN	ASP	ACC	ARM	Peso
EBAC	1,0000	4,0000	7,0000	6,0000	4,0000	0,5285
ASN	0,2500	1,0000	4,0000	3,0000	3,0000	0,2212
ASP	0,1429	0,2500	1,0000	0,3333	0,3333	0,0472
ACC	0,1667	0,3333	3,0000	1,0000	1,0000	0,0973
ARM	0,2500	0,3333	3,0000	1,0000	1,0000	0,1058

$$\lambda_{MAX} = 5,2050$$

$$IC = 0,0513$$

$$RC = 0,0462$$

<i>E7</i>	EBAC	ASN	ASP	ACC	ARM	Peso
EBAC	1,0000	3,0000	2,0000	3,0000	3,0000	0,3750
ASN	0,3333	1,0000	1,0000	4,0000	2,0000	0,2172
ASP	0,5000	1,0000	1,0000	0,5000	0,3333	0,1105
ACC	0,3333	0,2500	2,0000	1,0000	0,2500	0,0958
ARM	0,3333	0,5000	3,0000	4,0000	1,0000	0,2015

$$\lambda_{MAX} = 5,7047$$

$$IC = 0,1762$$

$$RC = 0,1587$$

Tabela 32: Julgamento dos Critérios cont.

<i>E8</i>	EBAC	ASN	ASP	ACC	ARM	Peso
EBAC	1,0000	4,0000	4,0000	3,0000	2,0000	0,4446
ASN	0,2500	1,0000	1,0000	2,0000	2,0000	0,1687
ASP	0,2500	1,0000	1,0000	2,0000	2,0000	0,1687
ACC	0,3333	0,5000	0,5000	1,0000	1,0000	0,1020
ARM	0,5000	0,5000	0,5000	1,0000	1,0000	0,1161
$\lambda_{MAX} = 5,2453$						
IC = 0,0613						
RC = 0,0553						

<i>E9</i>	EBAC	ASN	ASP	ACC	ARM	Peso
EBAC	1,0000	7,0000	7,0000	1,0000	4,0000	0,4272
ASN	0,1429	1,0000	1,0000	0,2500	1,0000	0,0754
ASP	0,1429	1,0000	1,0000	0,2500	1,0000	0,0754
ACC	1,0000	4,0000	4,0000	1,0000	4,0000	0,3377
ARM	0,2500	1,0000	1,0000	0,2500	1,0000	0,0844
$\lambda_{MAX} = 5,0504$						
IC = 0,0126						
RC = 0,0114						

Tabela 33: Julgamento dos Subcritérios EBAC.

<i>E1</i>	Média	Variância	Assimetria	Mediana	Aderência	Peso
Média	1,0000	1,0000	2,0000	2,0000	1,0000	0,2393
Variância	1,0000	1,0000	2,0000	3,0000	2,0000	0,2993
Assimetria	0,5000	0,5000	1,0000	3,0000	0,5000	0,1519
Mediana	0,5000	0,3333	0,3333	1,0000	0,3333	0,0831
Aderência	1,0000	0,5000	2,0000	3,0000	1,0000	0,2264
$\lambda_{MAX} = 5,1599$						
IC = 0,0400						
RC = 0,0360						

<i>E2</i>	Média	Variância	Assimetria	Mediana	Aderência	Peso
Média	1,0000	2,0000	5,0000	3,0000	2,0000	0,3804
Variância	0,5000	1,0000	4,0000	2,0000	2,0000	0,2566
Assimetria	0,2000	0,2500	1,0000	0,5000	0,3333	0,0638
Mediana	0,3333	0,5000	2,0000	1,0000	0,5000	0,1165
Aderência	0,5000	0,5000	3,0000	2,0000	1,0000	0,1827
$\lambda_{MAX} = 5,0671$						
IC = 0,0168						
RC = 0,0151						

Tabela 34: Julgamento do Subcritérios EBAC cont.

<i>E3</i>	Média	Variância	Assimetria	Mediana	Aderência	Peso
Média	1,0000	1,0000	1,0000	3,0000	2,0000	0,2761
Variância	1,0000	1,0000	1,0000	2,0000	2,0000	0,2497
Assimetria	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,1953
Mediana	0,3333	0,5000	1,0000	1,0000	1,0000	0,1350
Aderência	0,5000	0,5000	1,0000	1,0000	1,0000	0,1439

$$\lambda_{MAX} = 5,1209$$

$$IC = 0,0302$$

$$RC = 0,0272$$

<i>E4</i>	Média	Variância	Assimetria	Mediana	Aderência	Peso
Média	1,0000	2,0000	4,0000	1,0000	1,0000	0,2647
Variância	0,5000	1,0000	3,0000	0,5000	0,5000	0,1446
Assimetria	0,2500	0,3333	1,0000	0,2500	0,2500	0,0614
Mediana	1,0000	2,0000	4,0000	1,0000	1,0000	0,2647
Aderência	1,0000	2,0000	4,0000	1,0000	1,0000	0,2647

$$\lambda_{MAX} = 5,0198$$

$$IC = 0,0050$$

$$RC = 0,0045$$

<i>E5</i>	Média	Variância	Assimetria	Mediana	Aderência	Peso
Média	1,0000	1,0000	1,0000	6,0000	1,0000	0,2139
Variância	1,0000	1,0000	0,1667	6,0000	0,2500	0,1269
Assimetria	1,0000	6,0000	1,0000	6,0000	0,5000	0,2984
Mediana	0,1667	0,1667	0,1667	1,0000	0,2500	0,0404
Aderência	1,0000	4,0000	2,0000	4,0000	1,0000	0,3204

$$\lambda_{MAX} = 5,6189$$

$$IC = 0,1547$$

$$RC = 0,1394$$

<i>E6</i>	Média	Variância	Assimetria	Mediana	Aderência	Peso
Média	1,0000	5,0000	3,0000	3,0000	0,2500	0,2734
Variância	0,2000	1,0000	0,3333	0,5000	0,3333	0,0635
Assimetria	0,3333	3,0000	1,0000	2,0000	1,0000	0,1858
Mediana	0,3333	2,0000	0,5000	1,0000	0,3333	0,0954
Aderência	4,0000	3,0000	1,0000	3,0000	1,0000	0,3820

$$\lambda_{MAX} = 5,5961$$

$$IC = 0,1490$$

$$RC = 0,1343$$

Tabela 35: Julgamento dos Subcritérios EBAC cont.

<i>E7</i>	Média	Variância	Assimetria	Mediana	Aderência	Peso
Média	1,0000	2,0000	2,0000	2,0000	3,0000	0,3442
Variância	0,5000	1,0000	2,0000	2,0000	0,3333	0,1616
Assimetria	0,5000	0,5000	1,0000	4,0000	0,5000	0,1564
Mediana	0,5000	0,5000	0,2500	1,0000	0,3333	0,0828
Aderência	0,3333	3,0000	2,0000	3,0000	1,0000	0,2550

$$\lambda_{MAX} = 5,5515$$

$$IC = 0,1379$$

$$RC = 0,1242$$

<i>E8</i>	Média	Variância	Assimetria	Mediana	Aderência	Peso
Média	1,0000	2,0000	2,0000	2,0000	1,0000	0,2790
Variância	0,5000	1,0000	1,0000	1,0000	0,3333	0,1295
Assimetria	0,5000	1,0000	1,0000	2,0000	0,5000	0,1638
Mediana	0,5000	1,0000	0,5000	1,0000	0,5000	0,1234
Aderência	1,0000	3,0000	2,0000	2,0000	1,0000	0,3044

$$\lambda_{MAX} = 5,0783$$

$$IC = 0,0196$$

$$RC = 0,0176$$

<i>E9</i>	Média	Variância	Assimetria	Mediana	Aderência	Peso
Média	1,0000	0,5000	0,5000	1,0000	0,5000	0,1185
Variância	2,0000	1,0000	1,0000	4,0000	1,0000	0,2724
Assimetria	2,0000	1,0000	1,0000	4,0000	2,0000	0,3129
Mediana	1,0000	0,2500	0,2500	1,0000	0,5000	0,0898
Aderência	2,0000	1,0000	0,5000	2,0000	1,0000	0,2064

$$\lambda_{MAX} = 5,0966$$

$$IC = 0,0242$$

$$RC = 0,0218$$

Tabela 36: Julgamento dos Subcritérios ASN.

<i>E1</i>	Comp.	Soma	Intensidade	Rep. Max.	Peso
Comp.	1,0000	2,0000	0,5000	0,5000	0,1953
Soma	0,5000	1,0000	0,5000	0,5000	0,1381
Intensidade	2,0000	2,0000	1,0000	2,0000	0,3905
Rep. Max.	2,0000	2,0000	0,5000	1,0000	0,2761

$$\lambda_{MAX} = 4,1213$$

$$IC = 0,0404$$

$$RC = 0,0454$$

Tabela 37: Julgamento dos Subcritérios ASN cont.

<i>E2</i>	Comp.	Soma	Intensidade	Rep. Max.	Peso
Comp.	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,2500
Soma	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,2500
Intensidade	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,2500
Rep. Max.	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,2500

$$\lambda_{MAX} = 4,0000$$

$$IC = 0,0000$$

$$RC = 0,0000$$

<i>E3</i>	Comp.	Soma	Intensidade	Rep. Max.	Peso
Comp.	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,2500
Soma	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,2500
Intensidade	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,2500
Rep. Max.	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,2500

$$\lambda_{MAX} = 4,0000$$

$$IC = 0,0000$$

$$RC = 0,0000$$

<i>E4</i>	Comp,	Soma	Intensidade	Rep, Max,	Peso
Comp.	1,0000	2,0000	2,0000	2,0000	0,3952
Soma	0,5000	1,0000	2,0000	2,0000	0,2781
Intensidade	0,5000	0,5000	1,0000	1,0000	0,1634
Rep. Max.	0,5000	0,5000	1,0000	1,0000	0,1634

$$\lambda_{MAX} = 4,0606$$

$$IC = 0,0202$$

$$RC = 0,0227$$

<i>E5</i>	Comp.	Soma	Intensidade	Rep. Max.	Peso
Comp.	1,0000	3,0000	0,3333	0,3333	0,1585
Soma	0,3333	1,0000	0,3333	0,3333	0,0915
Intensidade	3,0000	3,0000	1,0000	3,0000	0,4755
Rep. Max.	3,0000	3,0000	0,3333	1,0000	0,2745

$$\lambda_{MAX} = 4,3094$$

$$IC = 0,1031$$

$$RC = 0,1159$$

Tabela 38: Julgamento dos Subcritérios ASN cont.

<i>E6</i>	Comp.	Soma	Intensidade	Rep. Max.	Peso
Comp.	1,0000	4,0000	2,0000	3,0000	0,4946
Soma	0,2500	1,0000	2,0000	2,0000	0,2183
Intensidade	0,5000	0,5000	1,0000	1,0000	0,1534
Rep. Max.	0,3333	0,5000	1,0000	1,0000	0,1337

$$\lambda_{MAX} = 4,1964$$

$$IC = 0,0655$$

$$RC = 0,0736$$

<i>E7</i>	Comp.	Soma	Intensidade	Rep. Max.	Peso
Comp.	1,0000	0,3333	0,3333	0,2500	0,0896
Soma	3,0000	1,0000	1,0000	3,0000	0,3778
Intensidade	3,0000	1,0000	1,0000	2,0000	0,3294
Rep. Max.	4,0000	0,3333	0,5000	1,0000	0,2031

$$\lambda_{MAX} = 4,1964$$

$$IC = 0,0655$$

$$RC = 0,0736$$

<i>E8</i>	Comp.	Soma	Intensidade	Rep. Max.	Peso
Comp.	1,0000	1,0000	1,0000	0,5000	0,2000
Soma	1,0000	1,0000	1,0000	0,5000	0,2000
Intensidade	1,0000	1,0000	1,0000	0,5000	0,2000
Rep. Max.	2,0000	2,0000	2,0000	1,0000	0,4000

$$\lambda_{MAX} = 4,0000$$

$$IC = 0,0000$$

$$RC = 0,0000$$

<i>E9</i>	Comp.	Soma	Intensidade	Rep. Max.	Peso
Comp.	1,0000	1,0000	2,0000	2,0000	0,3261
Soma	1,0000	1,0000	2,0000	3,0000	0,3629
Intensidade	0,5000	0,5000	1,0000	1,0000	0,1630
Rep. Max.	0,5000	0,3333	1,0000	1,0000	0,1480

$$\lambda_{MAX} = 4,0206$$

$$IC = 0,0069$$

$$RC = 0,0077$$

Tabela 39: Julgamento dos Subcritérios ASP.

<i>E1</i>	Comp.	Soma	Intensidade	Peso
Comp.	1,0000	1,0000	0,5000	0,2500
Soma	1,0000	1,0000	0,5000	0,2500
Intensidade	2,0000	2,0000	1,0000	0,5000

$$\lambda_{MAX} = 3,0000$$

$$IC = 0,0000$$

$$RC = 0,0000$$

<i>E2</i>	Comp.	Soma	Intensidade	Peso
Comp.	1,0000	1,0000	1,0000	0,3333
Soma	1,0000	1,0000	1,0000	0,3333
Intensidade	1,0000	1,0000	1,0000	0,3333

$$\lambda_{MAX} = 3,0000$$

$$IC = 0,0000$$

$$RC = 0,0000$$

<i>E3</i>	Comp.	Soma	Intensidade	Peso
Comp.	1,0000	1,0000	1,0000	0,3333
Soma	1,0000	1,0000	1,0000	0,3333
Intensidade	1,0000	1,0000	1,0000	0,3333

$$\lambda_{MAX} = 3,0000$$

$$IC = 0,0000$$

$$RC = 0,0000$$

<i>E4</i>	Comp,	Soma	Intensidade	Peso
Comp.	1,0000	2,0000	2,0000	0,4934
Soma	0,5000	1,0000	2,0000	0,3108
Intensidade	0,5000	0,5000	1,0000	0,1958

$$\lambda_{MAX} = 3,0536$$

$$IC = 0,0268$$

$$RC = 0,0516$$

<i>E5</i>	Comp.	Soma	Intensidade	Peso
Comp.	1,0000	3,0000	0,3333	0,2499
Soma	0,3333	1,0000	0,1667	0,0953
Intensidade	3,0000	6,0000	1,0000	0,6548

$$\lambda_{MAX} = 3,0183$$

$$IC = 0,0091$$

$$RC = 0,0176$$

Tabela 40: Julgamento dos Subcritérios ASP cont.

<i>E6</i>	Comp.	Soma	Intensidade	Peso
Comp.	1,0000	0,3333	0,3333	0,1396
Soma	3,0000	1,0000	0,5000	0,3325
Intensidade	3,0000	2,0000	1,0000	0,5278

$$\lambda_{MAX} = 3,0536$$

$$IC = 0,0268$$

$$RC = 0,0516$$

<i>E7</i>	Comp.	Soma	Intensidade	Peso
Comp.	1,0000	0,3333	0,5000	0,1571
Soma	3,0000	1,0000	3,0000	0,5936
Intensidade	2,0000	0,3333	1,0000	0,2493

$$\lambda_{MAX} = 3,0536$$

$$IC = 0,0268$$

$$RC = 0,0516$$

<i>E8</i>	Comp.	Soma	Intensidade	Peso
Comp.	1,0000	1,0000	1,0000	0,3333
Soma	1,0000	1,0000	1,0000	0,3333
Intensidade	1,0000	1,0000	1,0000	0,3333

$$\lambda_{MAX} = 3,0000$$

$$IC = 0,0000$$

$$RC = 0,0000$$

<i>E9</i>	Comp.	Soma	Intensidade	Peso
Comp.	1,0000	2,0000	1,0000	0,4126
Soma	0,5000	1,0000	1,0000	0,2599
Intensidade	1,0000	1,0000	1,0000	0,3275

$$\lambda_{MAX} = 3,0536$$

$$IC = 0,0268$$

$$RC = 0,0516$$

Tabela 41: Julgamento dos Subcritérios ARM.

<i>E1</i>	Média	ARCH	LJUNG-BOX	Peso
Média	1,0000	2,0000	2,0000	0,4934
ARCH	0,5000	1,0000	0,5000	0,1958
LJUNG-BOX	0,5000	2,0000	1,0000	0,3108

$$\lambda_{MAX} = 3,0536$$

$$IC = 0,0268$$

$$RC = 0,0516$$

Tabela 42: Julgamento dos Subcritérios ARM cont.

<i>E2</i>	Média	ARCH	LJUNG-BOX	Peso
Média	1,0000	3,0000	2,0000	0,5396
ARCH	0,3333	1,0000	0,5000	0,1634
LJUNG-BOX	0,5000	2,0000	1,0000	0,2970

$$\lambda_{MAX} = 3,0092$$

$$IC = 0,0046$$

$$RC = 0,0088$$

<i>E3</i>	Média	ARCH	LJUNG-BOX	Peso
Média	1,0000	0,5000	0,2500	0,1311
ARCH	2,0000	1,0000	0,2500	0,2081
LJUNG-BOX	4,0000	4,0000	1,0000	0,6608

$$\lambda_{MAX} = 3,0536$$

$$IC = 0,0268$$

$$RC = 0,0516$$

<i>E4</i>	Média	ARCH	LJUNG-BOX	Peso
Média	1,0000	1,0000	0,5000	0,2500
ARCH	1,0000	1,0000	0,5000	0,2500
LJUNG-BOX	2,0000	2,0000	1,0000	0,5000

$$\lambda_{MAX} = 3,0000$$

$$IC = 0,0000$$

$$RC = 0,0000$$

<i>E5</i>	Média	ARCH	LJUNG-BOX	Peso
Média	1,0000	3,0000	2,0000	0,5396
ARCH	0,3333	1,0000	0,5000	0,1634
LJUNG-BOX	0,5000	2,0000	1,0000	0,2970

$$\lambda_{MAX} = 3,0092$$

$$IC = 0,0046$$

$$RC = 0,0088$$

<i>E6</i>	Média	ARCH	LJUNG-BOX	Peso
Média	1,0000	4,0000	3,0000	0,6337
ARCH	0,2500	1,0000	1,0000	0,1744
LJUNG-BOX	0,3333	1,0000	1,0000	0,1919

$$\lambda_{MAX} = 3,0092$$

$$IC = 0,0046$$

$$RC = 0,0088$$

Tabela 43: Julgamento dos Subcritérios ARM cont.

<i>E7</i>	Média	ARCH	LJUNG-BOX	Peso
Média	1,0000	3,0000	2,0000	0,5472
ARCH	0,3333	1,0000	2,0000	0,2631
LJUNG-BOX	0,5000	0,5000	1,0000	0,1897

$$\lambda_{MAX} = 3,1356$$

$$IC = 0,0678$$

$$RC = 0,1304$$

<i>E8</i>	Média	ARCH	LJUNG-BOX	Peso
Média	1,0000	1,0000	0,2500	0,1667
ARCH	1,0000	1,0000	0,2500	0,1667
LJUNG-BOX	4,0000	4,0000	1,0000	0,6667

$$\lambda_{MAX} = 3,0000$$

$$IC = 0,0000$$

$$RC = 0,0000$$

<i>E9</i>	Média	ARCH	LJUNG-BOX	Peso
Média	1,0000	0,5000	0,2500	0,1494
ARCH	2,0000	1,0000	1,0000	0,3764
LJUNG-BOX	4,0000	1,0000	1,0000	0,4742

$$\lambda_{MAX} = 3,0536$$

$$IC = 0,0268$$

$$RC = 0,0516$$

Apêndice II

Respostas Especialistas do Exemplo Adaptado

Tabela 44: Respostas e Resultados dos Especialistas do setor administrativo.

AGRUPAMENTO 1 - ESPECIALISTAS DO SETOR ADMINISTRATIVO									
RESPOSTAS E RESULTADOS ESPECIALISTA 1									
COMPARAÇÕES PARITÁRIAS									
E1	CC	#P	\$\$						
CC	1,00	7,00	2,00	CC	1,00	0,57		Lambda Max	3,08
#P	0,14	1,00	0,13	#P	0,11	0,06		IC	0,04
\$\$	0,50	8,00	1,00	\$\$	0,66	0,37		RC	0,08
RESPOSTAS E RESULTADOS ESPECIALISTA 2									
COMPARAÇÕES PARITÁRIAS									
E2	CC	#P	\$\$						
CC	1,00	5,00	2,00	CC	1,00	0,57		Lambda Max	3,02
#P	0,20	1,00	0,25	#P	0,17	0,10		IC	0,01
\$\$	0,50	4,00	1,00	\$\$	0,58	0,33		RC	0,02
RESPOSTAS E RESULTADOS ESPECIALISTA 3									
COMPARAÇÕES PARITÁRIAS									
E3	CC	#P	\$\$						
CC	1,00	2,00	3,00	CC	1,00	0,54		Lambda Max	3,01
#P	0,50	1,00	2,00	#P	0,55	0,30		IC	0,00
\$\$	0,33	0,50	1,00	\$\$	0,30	0,16		RC	0,01

Tabela 45: Respostas e Resultados dos Especialistas do setor pedagógico.

AGRUPAMENTO 2 - ESPECIALISTAS DO SETOR PEDAGÓGICO									
RESPOSTAS E RESULTADOS ESPECIALISTA 4									
COMPARAÇÕES PARITÁRIAS									
E4	CC	#P	\$\$		AutoValor	Pesos		Lambda Max	3,08
CC		1,00	0,14	0,50	CC	0,11	0,09	IC	0,04
#P		7,00	1,00	8,00	#P	1,00	0,79	RC	0,08
\$\$		2,00	0,13	1,00	\$\$	0,16	0,13		
RESPOSTAS E RESULTADOS ESPECIALISTA 5									
COMPARAÇÕES PARITÁRIAS									
E5	CC	#P	\$\$		AutoValor	Pesos		Lambda Max	3,02
CC		1,00	0,20	0,50	CC	0,17	0,12	IC	0,01
#P		5,00	1,00	4,00	#P	1,00	0,68	RC	0,02
\$\$		2,00	0,25	1,00	\$\$	0,29	0,20		
RESPOSTAS E RESULTADOS ESPECIALISTA 6									
COMPARAÇÕES PARITÁRIAS									
E6	CC	#P	\$\$		AutoValor	Pesos		Lambda Max	3,05
CC		1,00	0,25	2,00	CC	0,31	0,21	IC	0,03
#P		4,00	1,00	4,00	#P	1,00	0,66	RC	0,05
\$\$		0,50	0,25	1,00	\$\$	0,20	0,13		

Tabela 46: Respostas e Resultados dos Especialistas do setor financeiro.

AGRUPAMENTO 3 - ESPECIALISTAS DO SETOR FINANCEIRO									
RESPOSTAS E RESULTADOS ESPECIALISTA 7									
COMPARAÇÕES PARITÁRIAS									
E7	CC	#P	SS		AutoValor	Pesos	Lambda Max		
CC	1,00	1,00	0,33		CC	0,33	0,20	IC	0,00
#P	1,00	1,00	0,33		#P	0,33	0,20	RC	0,00
SS	3,00	3,00	1,00		SS	1,00	0,60		
RESPOSTAS E RESULTADOS ESPECIALISTA 8									
COMPARAÇÕES PARITÁRIAS									
E8	CC	#P	SS		AutoValor	Pesos	Lambda Max		
CC	1,00	1,00	0,50		CC	0,50	0,25	IC	-
#P	1,00	1,00	0,50		#P	0,50	0,25	RC	-
SS	2,00	2,00	1,00		SS	1,00	0,50		
RESPOSTAS E RESULTADOS ESPECIALISTA 9									
COMPARAÇÕES PARITÁRIAS									
E9	CC	#P	SS		AutoValor	Pesos	Lambda Max		
CC	1,00	0,50	0,25		CC	0,20	0,13	IC	0,03
#P	2,00	1,00	0,25		#P	0,31	0,21	RC	0,05
SS	4,00	4,00	1,00		SS	1,00	0,66		

Apêndice III

Modelos PAR(p)

O modelo PAR(p) apresentado em sua forma padronizada é dado pela seguinte equação:

$$\left(\frac{Y_t - \mu_m}{\sigma_m}\right) = \varphi_1^m \left(\frac{Y_{t-1} - \mu_{m-1}}{\sigma_{m-1}}\right) + \dots + \varphi_{p_m}^m \left(\frac{Y_{t-p_m} - \mu_{m-p_m}}{\sigma_{m-p_m}}\right) + a_t^m \quad (20)$$

$$Y_t = \mu_m + \varphi_1^m \sigma_m \left(\frac{Y_{t-1} - \mu_{m-1}}{\sigma_{m-1}}\right) + \dots + \varphi_{p_m}^m \sigma_m \left(\frac{Y_{t-p_m} - \mu_{m-p_m}}{\sigma_{m-p_m}}\right) + \sigma_m a_t^m \quad (21)$$

Onde:

Y_t série sazonal de período $s = 12$;

t índice de tempo, $t = 1, 2, \dots, sN$, função do ano T ($T = 1, 2, \dots, N$) e do período m ($m = 1, 2, \dots, s$);

N número de anos;

μ_m média sazonal do período m ;

φ_m^i i -ésimo coeficiente auto regressivo do período m ;

p_m ordem do operador auto regressivo do período m ;

a_t^m série de ruídos independentes com média zero e variância $\sigma_a^2(m)$.

O modelo apresentado acima é aplicado ao contexto do SEB nas séries de ENA (Energia Natural Afluente) para cada um dos subsistemas (OLIVEIRA, 2010). As etapas de identificação das ordens “p” e a estimação dos parâmetros do modelo são apresentadas detalhadamente em (PENNA, 2009), (OLIVEIRA, 2010), (OLIVEIRA, 2013), (FERREIRA, 2013).

I. Modelo PAR(p) Lognormal

Para o modelo PAR(p) Lognormal é ajustado a partir dos resíduos calculados uma distribuição LogNormal de três parâmetros (CEPEL, 2015) onde a correlação entre os subsistemas é embutida na distribuição ajustada pelo terceiro parâmetro (chamado de deslocamento), dessa forma a característica de complementariedade é preservada na modelagem. As estimações dos parâmetros do modelo são apresentadas detalhadamente em (PENNA, 2009), (OLIVEIRA, 2010), (OLIVEIRA, 2013), (FERREIRA, 2013).

II. Modelo PAR(p) Bootstrap

Em (OLIVEIRA, 2010) foi proposto um método baseado na técnica não paramétrica de computação intensiva Bootstrap, (EFRON & TIBSHIRANI, 1993), para geração dos ruídos do modelo gerador de séries sintéticas em substituição ao uso da variável aleatória Lognormal. O método propõe que os próprios resíduos do modelo PAR(p) ajustado ao histórico de ENA sejam sorteados de forma aleatória – com reposição - e adicionados à equação de geração dos cenários.

III. Modelo PAR(p) Bootstrap Monte Carlo

Em (OLIVEIRA, 2013) foi proposto uma metodologia para geração de ruídos aleatórios utilizando o chamado Método de Monte-Carlo, proposto por (METROPOLIS, 1949), em seus algoritmos. De acordo com (OLIVEIRA, 2013), os dois principais requisitos para os métodos de simulação de Monte Carlo são: possuir o conhecimento das distribuições de probabilidade das variáveis de entrada do sistema e possuir um gerador de números aleatórios para gerar cenários das variáveis de entrada do sistema. Simulando um grande número de cenários, a distribuição de probabilidade de todas as saídas da simulação pode ser aproximada com precisão, que aumenta à medida que o número de cenários aumenta.

IV. Modelo PAR(p) MCMC

Segundo (BALDIOTI 2017) a ideia da técnica MCMC é realizar uma simulação de Monte Carlo utilizando cadeias de Markov. Esse método permite simulações de uma distribuição ao embuti-la como distribuição limite da cadeia de Markov. Essa técnica se mostra bastante útil quando a densidade é muito complicada para se amostrar e/ou é definida com um número muito alto de dimensões. A ideia em utilizar esse método no contexto proposto é aliar a dificuldade de se amostrar de uma função complicada que apresenta um elevado número de dimensões com a praticidade e robustez computacional que o método proporciona.

O objetivo central é gerar amostras ruídos a partir de uma distribuição ou aproximar $E[f(X)]$, $X \sim \pi$. Este método produz uma cadeia de Markov onde a distribuição limite (π) pode ser parcialmente conhecida e a sequência de amostras é obtida através de uma cadeia de Markov.