

DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA DE ANÁLISE

**Apoio à Implementação da Proposta de
Preparação de Instrumentos de Mercado
(MRP) do Brasil - Componente 2B**

PRODUTO A.2

FICHA TÉCNICA

ESTUDO

Produto A.2 – Definição da Metodologia de Análise.

PROJETO

Apoio à Implementação da Proposta de Preparação de Instrumentos de Mercado (MRP) do Brasil – Componente 2B.

FINANCIAMENTO

The Word Bank

APOIO

Ministério da Economia

EQUIPE

Cláudia Hiromi, FGVces
Guarany Osório, FGVces
Guilherme Borba Lefèvre, FGVces
Gustavo Velloso Breviglieri, FGVces
Mario Prestes Monzoni Neto, FGVces

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Alketa Peci, Inaiê Takes Santos e George Magalhães pelas valiosas contribuições durante a elaboração deste estudo.

CITAR COMO

FGVces. Produto A.2 – Definição da Metodologia de Análise. Apoio à Implementação da Proposta de Preparação de Instrumentos de Mercado (MRP) do Brasil - Componente 2B. Centro de Estudos em Sustentabilidade da Escola de Administração de Empresas de São Paulo da Fundação Getúlio Vargas. São Paulo, 2020.

REALIZAÇÃO



Sumário

LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS	4
EXECUTIVE SUMMARY	5
SUMÁRIO EXECUTIVO	8
INTRODUÇÃO	11
1. CONTEXTUALIZAÇÃO: AIR DO PROJETO PMR BRASIL E MÉTODOS INDICADOS.....	13
2. ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS - AHP	16
2.1 ESCALA DE JULGAMENTO	23
2.2 MÉTODOS PARA DERIVAR PRIORIDADES	26
2.3 AGREGAÇÃO OU SÍNTESE.....	32
2.4 DECISÃO EM GRUPOS.....	33
2.5 CONSISTÊNCIA	36
2.6 LIMITAÇÕES E CRÍTICAS.....	38
3. SELEÇÃO DE CENÁRIOS DE PRECIFICAÇÃO DE CARBONO (MÉTODOS DE PREVALÊNCIA) .	41
3.1 ELECTRE.....	42
3.2 PROMETHEE.....	45
4. TEORIA DA UTILIDADE MULTIATRIBUTO - MAUT	50
5. TÉCNICA DE RANQUEAMENTO MULTIATRIBUTO SIMPLES (SMART).....	59
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E PRÓXIMOS PASSOS	65
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

AHP	Analytical Hierarchy Process
AIJ	Agregação dos Julgamentos Individuais
AIP	Agregação das Prioridades Individuais
AIR	Análise de Impacto Regulatório
AMC	Análise Multicritério
CI	Índice de Consistência
CR	Razão de Consistência
DEX	Decision Expert
DSS	Decision Support Systems
ELCE	Equally Likely Certainty Equivalent
ELECTRE	Elimination et Choix Traduisant la Réalité
EUA	Estados Unidos da América
FGV	Fundação Getulio Vargas
IPC	Instrumento de Precificação de Carbono
MAUT	Multi-Attribute Theory
MAVT	Teoria de Valor Multiatributo
MFA	Material Flow Analysis
MRP	Market Readiness Proposal
NDC	Contribuição Nacionalmente Determinada
PIB	Produto Interno Bruto
PMR	Partnership for Market Readiness
PROMETHEE	Preference Ranking Organisation Method for Enrichment of Evaluations
RI	Índice Aleatório
RIA	Regulatory Impact Analysis
SDSS	Spatial Decision Support System
SMART	Simple Multi-Attribute Ranking Technique
SMARTER	SMART Exploiting Ranks
SMARTS	SMART Using Swing Weights
SWOT	Strengths, Weaknesses, Opportunities & Threats
WGM	Médias Geométricas Ponderadas
WLC	Combinação linear ponderada

EXECUTIVE SUMMARY

The previous product, **Product A.1**, presented the Regulatory Impact Analysis (RIA) currently in development, outlining the general strategy for its implementation and introducing the methods to be employed in order to assess and compare the regulatory alternatives for the adoption of carbon pricing instruments in Brazil. Thus, the following methods are better detailed and discussed here based on a literature review:

- ▣ Analytical Hierarchy Process – AHP, to weigh the criteria; and
- ▣ Multi-Attribute Theory – MAUT, and *Simple Multi-Attribute Ranking Technique* – SMART, to score and rank the alternatives.

Therefore, this **Product A.2** seeks to increase the level of theoretical familiarity enjoyed by the reader when facing the procedures to be adopted throughout the implementation of the multicriteria analysis conducted as part of the Project PMR Brazil's RIA.

The AHP, proposed by Thomas L. Saaty in the 1970s, is one of the most modern and well-established decision-making models (Benítez, Delgado-Galván, Gutiérrez, & Izquierdo, 2011). It is better defined as a technique to retrieve priorities in a decision environment composed of multiple criteria (Bernasconi, Choirat, & Seri, 2014).

The AHP is a method for pairwise comparisons, with origins in psychology, that offers greater reliability and consistency to decision-making processes, allowing for cross-checking between the elements being compared, and whose direct comparisons seem necessary to perform the measurement of intangible attributes/properties and that do not have established scales or measures.

In this method, the decision problem is organized according to a hierarchical structure of goals, criteria and sub-criteria. The highest level of the hierarchy represents the decision goal, the problem to be addressed, while the intermediate levels correspond to the criteria and sub-criteria and the lowest level contains the decision alternatives (Ramanathan, 2001).

For each level in the hierarchy, the application of the method starts with the decision-maker(s) indicating the dominance between any of the pairs of relevant items for the problem at hand, according to a relative scale. These judgements, then, are registered into a reciprocal matrix that

provides the basis for the procedures the analyst may employ to derive priorities, for instance, through the calculus of the mean of normalized values or through the eigenvalue approach.

The process of synthesis of results in the AHP method is developed by multiplying the priority vector of the alternatives by the corresponding weight of each criterion and adding the results to obtain the final composition of priorities for the alternatives, with respect to the decision goal. In the Project PMR Brazil, the priority vector for the alternatives will be provided by the MAUT and SMART methods.

The multi-attribute utility theories, developed by Keeney & Raifa (1976), have become increasingly more popular in supporting decision analyses about real life problems, whether used in isolation or combined with other methodologies. The method is based on the expected utility theory and starts from the hypothesis that each decision-maker attempts to consciously or implicitly optimize a function that aggregates all of their viewpoints. MAUT, then, seeks to overcome the limitations of single attribute functions and is based on the premise that all decision-makers try to optimize a function that considers all relevant attributes.

The application of the method involves the relative measurement of the attributes (criteria / alternatives) through the assignment of a score within a normalized interval, for instance, between 0 and 1 or between 0 and 100. Since the attributes are measured in different units, the normalization is necessary to allow the summation of marginal utilities (Gómez-Limón & Martínez, 2006). For an interval between 0 and 1, the marginal utility functions are such that the best alternative in a given criterion has a score of 1 and the worst alternative receives a score of 0 (Ishizaka & Nemery, 2013). The process of evaluating different alternatives with MAUT, therefore, takes into consideration the range in which their performance varies under a certain criterion.

Lastly, the simple multi-attribute rating technique, implemented by Edwards (1977), is a simpler version of MAUT. Thus, it carries several of the same advantages already offered by MAUT with the additional benefits of its enhanced simplicity of use and transparency, features that make it highly popular, especially when there is easy access to the judges/decision-makers.

The technical steps of SMART and its extensions consist of identifying the actors and issues involved, assigning values to the criteria, normalizing the scores, assigning weights to the criteria and, finally, calculating the utility. Here, a direct assessment (for example, a score from 0 to 10) by

stakeholders or decision makers is required, which is then converted into standardized notes, expressing the relative importance attributed by them.

In this sense, one can argue that SMART is a less objective approach. However, subjectivity can be minimized by the participation of a relatively diverse group in the evaluation processes. In this case, it will be important to ensure the participation of representatives from the different segments: government, the private sector, academia and civil society. The steps for the synthesis of the results are similar to those of MAUT: the standardized scores are weighted by the weights assigned to the criteria and added up.

With the methods chosen and presented, the next steps for the Project PMR Brazil regulatory impact analysis will focus on the data collection processes for the application of these methods, which have already started with a first round of questionnaires. At the end of such processes, it will be possible to: i) build the decision problem hierarchy, with the identification of all relevant criteria; ii) weigh the criteria; iii) assess the regulatory alternatives within those criteria; and iv) calculate the global utility of each alternative.

SUMÁRIO EXECUTIVO

O produto anterior, **Produto A.1**, apresentou a AIR em desenvolvimento, delineando a estratégia geral para sua implementação, com a introdução dos métodos a serem empregados para avaliação e comparação das alternativas regulatórias para adoção de instrumentos de precificação de carbono (IPCs), detalhados e discutidos aqui a partir de revisão bibliográfica, quais sejam:

- ▣ *Analytical Hierarchy Process* - AHP, para a ponderação dos critérios; e
- ▣ Teoria da Utilidade Multiatributo (*Multi-Attribute Theory* - MAUT) e Técnica de Ranqueamento Multiatributo Simples (*Simple Multi-Attribute Ranking Technique* - SMART), para pontuação e ranqueamento das alternativas.

O intuito, portanto, deste **Produto A.2** é o de permitir maior grau de familiaridade teórica do leitor frente aos procedimentos que serão adotados na prática ao longo da condução da AMC pertencente à AIR do **Projeto PMR Brasil**.

O AHP, proposto por Thomas L. Saaty nos anos 1970, é um dos mais modernos e bem-estabelecidos modelos de tomada de decisão (Benítez, Delgado-Galván, Gutiérrez, & Izquierdo, 2011), melhor definido como uma técnica para estabelecer prioridades em um ambiente de decisão sob múltiplos critérios (Bernasconi, Choirat, & Seri, 2014).

Trata-se de método de comparações emparelhadas, com origens na psicologia, e que confere maior confiabilidade e consistência ao processo de tomada de decisão, permitindo a realização de verificação cruzada entre os elementos sendo comparados, e cujas comparações diretas parecem ser necessárias para realizar a mensuração de atributos/propriedades intangíveis e que não possuem escalas ou medidas estabelecidas.

No AHP o problema de decisão é organizado de acordo com uma estrutura hierárquica de objetivos, critérios e subcritérios. O nível mais elevado da hierarquia é o foco do problema (objetivo da decisão), ao passo que os níveis intermediários correspondem aos critérios e subcritérios e o nível inferior contém as alternativas de decisão (Ramanathan, 2001).

Para cada nível da hierarquia, o procedimento de aplicação do método tem início com o(s) tomador(es) de decisão indicando, em uma escala relativa, a dominância entre qualquer um dos

pares de itens relevantes para o problema de decisão. Esses julgamentos são, então, registrados em uma matriz recíproca que fornece a base para a derivação de prioridades, por exemplo, a partir das médias dos valores normalizados ou da abordagem via autovalor.

O processo de síntese dos resultados no método AHP é desenvolvido ao multiplicar o vetor de prioridades, isto é o desempenho, das alternativas pelo peso correspondente de cada critério, somando os resultados e, assim, obtendo a composição final das prioridades das alternativas com respeito ao objetivo da decisão. No **Projeto PMR Brasil**, a atribuição do desempenho das alternativas será fornecida pelos métodos MAUT e SMART.

As teorias de utilidade multiatributo, desenvolvidas por Keeney & Raifa (1976), têm se tornado cada vez mais populares no auxílio de análises de decisão em problemas do mundo real, utilizadas individualmente ou em conjunto com outras metodologias. O método se baseia na teoria de utilidade esperada e parte das hipóteses de que cada tomador de decisão tenta otimizar consciente ou implicitamente uma função que agrega todos os seus pontos de vista. A MAUT busca superar as limitações das funções de atributo único e, assim, se baseia na hipótese de que todo tomador de decisão busca otimizar uma função que agrega todos os atributos relevantes.

A aplicação do método envolve a mensuração relativa dos atributos (critérios) por meio da atribuição de nota em um intervalo normalizado, por exemplo, entre 0 e 1 ou entre 0 e 100. Como os atributos são mensurados em unidades diferentes, a normalização é necessária para permitir a adição das utilidades marginais (Gómez-Limón & Martínez, 2006). Para um intervalo entre 0 e 1, as funções de utilidade marginal são tais que a melhor alternativa para um determinado critério tem pontuação igual a 1 e a pior alternativa tem pontuação igual a 0 (Ishizaka & Nemery, 2013). A avaliação das alternativas com utilização da MAUT, portanto, considera o intervalo (*range*) em que o desempenho delas varia sob um dado critério.

Por fim, a técnica de ranqueamento multiatributo simples, implementada por Edwards (1977), é uma versão mais simples da MAUT. Assim, ela carrega vantagens semelhantes às da MAUT com o benefício adicional da simplicidade de uso e transparência que a torna popular sobretudo quando há fácil acesso aos juízes/tomadores de decisão.

Os passos técnicos da SMART e extensões consistem em identificar os atores e questões envolvidas, atribuir valores aos critérios, normalizar as notas, atribuir pesos aos critérios e, por fim,

calcular a utilidade. Aqui, será necessária uma avaliação direta (por exemplo, nota de 0 a 10) pelos *stakeholders* ou tomadores de decisão, que serão convertidas em notas normalizadas, expressando a importância relativa atribuída por estes.

Dessa maneira, pode-se argumentar que a SMART é menos objetiva. Entretanto, a subjetividade pode ser minimizada pela participação de um grupo relativamente diverso na avaliação. Nesse caso, será importante assegurar a participação de representantes dos diferentes segmentos: governo, setor privado, academia e sociedade civil. Os passos para a síntese dos resultados são semelhantes aos da MAUT: as notas normalizadas são ponderadas pelos pesos designados aos critérios, prosseguindo-se com a soma delas.

Definidos e apresentados os métodos, os próximos passos da AIR do **Projeto PMR Brasil** dizem respeito às etapas de coleta de dados para aplicação desses métodos, já iniciadas com a primeira rodada de questionários, e que, ao final do processo, permitirão: i) construir a hierarquia do problema de decisão, com a identificação dos critérios relevantes; ii) ponderar os critérios; iii) avaliar as alternativas de regulação dentro desses critérios; e iv) calcular a utilidade global de cada alternativa.

INTRODUÇÃO

O presente documento corresponde ao **Produto A.2 - Definição da Metodologia de Análise**, do **Contrato Nº 7180192** celebrado entre **The World Bank**, doravante denominado como **Banco Mundial**, e a **Fundação Getulio Vargas - FGV**, objetivando o **apoio à implementação da Proposta de Preparação de Instrumentos de Mercado (*Market Readiness Proposal* - MRP) do Brasil**, no contexto da **Parceria para Preparação de Instrumentos de Mercado (*Partnership for Market Readiness* - PMR)**.

No âmbito do **Projeto PMR Brasil**, em seu **Componente 2**, de Avaliação de Impacto, convencionou-se a divisão das atividades entre o **Componente 2A**, responsável pela realização de modelagem macroeconômica dos impactos de instrumentos de precificação de carbono (IPCs), e o **Componente 2B**, dedicado à Análise de Impacto Regulatório - AIR dos cenários propostos.

O **Componente 2B** atua como integrador metodológico do Projeto, consolidando e complementando os resultados dos trabalhos do **Componente 2A** com informações adicionais e, adicionalmente, é responsável pela comparação de diferentes cenários de precificação de carbono, com o emprego dos métodos mais adequados para tanto, e geração de resultados claros e assertivos.

Há de se notar que, em decorrência da alteração da equipe responsável pela condução de tal Componente e “por conta das restrições de tempo presentes e dos avanços na execução do trabalho dos outros componentes de **Projeto PMR Brasil**, os objetivos e escopo do trabalho da AIR foram simplificados em relação à proposta original contida no Termo de Referência do Componente 2B” (PMR, 2019).

Nesse contexto, o **Produto A.1 - Descrição dos cenários e da estratégia de implementação da AIR** apresentou a AIR em desenvolvimento, delineando a estratégia geral para sua implementação, com a introdução dos métodos a serem empregados para avaliação e comparação das alternativas regulatórias para adoção de IPCs, quais sejam:

- ▣ *Analytical Hierarchy Process* - AHP, para a ponderação dos critérios; e
- ▣ Teoria da utilidade multiatributo (*Multi-Attribute Theory* - MAUT) e Técnica de ranqueamento multiatributo simples (*Simple Multi-Attribute Ranking Technique* - SMART), para pontuação

e ranqueamento das alternativas.

É, portanto, objetivo deste **Produto A.2** aprofundar a descrição e o detalhamento dos métodos elencados acima, brevemente indicando suas origens, principais aplicações, vantagens e desvantagens, bem como eventuais adaptações necessárias para a implementação da AIR do **Projeto PMR Brasil**. Adicionalmente, o presente relatório também apresenta racional passível de aplicação, caso necessário, para a redução do número de alternativas levadas em consideração na AIR e aponta os próximos passos a serem seguidos por este componente do Projeto.

1. Contextualização: AIR do Projeto PMR Brasil e Métodos indicados

A presente seção busca resumir alguns dos principais pontos relacionados aos métodos indicados na estratégia preliminar para implementação da AIR do **Projeto PMR Brasil**, conforme desenvolvido e estipulado pelo **Produto A.1**. Tal produto procurou estabelecer as bases para a implementação de uma Análise Multicritério - AMC, como uma ferramenta de uma AIR, que deve permitir a identificação das principais preocupações e percepções de diferentes *stakeholders* acerca da adoção de instrumentos de precificação de carbono que permitam o atingimento das metas do Brasil no âmbito do Acordo de Paris.

Nesse sentido, cabe lembrar o caráter primordial de uma Análise de Impacto Regulatório, qual seja, o de auxiliar os formuladores de políticas públicas a contemplar, questionar e sistematicamente comparar diferentes opções de intervenção/regulação, levando em consideração suas observadas e/ou prováveis consequências positivas e negativas. Quando realizada de maneira antecipatória à adoção de alguma política, uma AIR também colabora para o avanço de determinado tema na agenda pública e do governo.

Historicamente, a elaboração e condução de AIRs são mais comumente marcadas pelo uso de análises custo-benefício ou de custo-efetividade. Entretanto, recentemente, maior atenção tem sido dedicada ao uso de análises multicritério, abordagem também perseguida na AIR do **Projeto PMR Brasil**. Tal abordagem oferece a possibilidade de comparar diferentes possibilidades de políticas públicas de acordo com critérios e impactos distintos, mesmo aqueles cuja quantificação em termos monetários não é trivial ou exequível.

Todas as abordagens de AMCs necessitam e dependem de julgamentos dos tomadores de decisão e *stakeholders* envolvidos com o problema em discussão, porém se diferenciam no que diz respeito às maneiras que empregam para coletar, tratar e combinar essas informações. Tais julgamentos, e seu caráter subjetivo, perpassam todas as etapas da análise, desde o estabelecimento dos objetivos a serem atingidos, até a definição dos critérios e de sua importância relativa para atingir os objetivos, até, finalmente, a avaliação do desempenho de cada alternativa dentro de cada critério (Dodgson, Spackman, Pearman, & Phillips, 2009).

Em que pese as dificuldades, e talvez impossibilidade, de diagnosticar a existência de algum método de AMC que seja inequivocamente superior para determinado problema ou processo de

tomada de decisão (Bouyssou, Perny, Pirlot, Tsoukias, & Vincke, 1993), o **Projeto PMR Brasil** empregará a combinação de três métodos, já mencionados, o AHP, o MAUT e o SMART.

Desses métodos, o AHP será utilizado para a ponderação dos critérios a partir dos quais os diferentes arranjos de precificação de carbono serão comparados. O AHP estrutura o problema de decisão a partir de uma hierarquia, com objetivo no topo, critérios em níveis intermediários, e alternativas na base (Palcic & Lalic, 2009), e se baseia no uso de comparações emparelhadas para atribuir a importância relativa entre os elementos de um mesmo nível hierárquico. A aplicação do AHP é bastante simples e, conseqüentemente, o método é frequentemente empregado no campo das políticas públicas e para auxiliar em processos de planejamento (Velasquez & Hester, 2013). Tal método é foco da **Seção 2**.

O número de critérios resultará das respostas obtidas junto aos participantes da primeira rodada de questionários, não sendo necessariamente o mesmo número de subcritérios por cada critério “macro”. Após o recebimento das respostas será avaliada a necessidade de redução do número de critérios levantados para possibilitar a consideração e conseqüente avaliação das alternativas dentro de cada um destes critérios em outra rodada de questionários¹. Se, realmente, tal necessidade se confirmar, alguns métodos possíveis e indicados para tal procedimento são brevemente expostos na **Seção 3**.

A pontuação de cada alternativa dentro de cada critério, no âmbito do **Projeto PMR Brasil**, se dará a partir dos métodos MAUT e SMART. O primeiro possibilita o ranqueamento global das alternativas ao assumir que existe uma curva de utilidades que representa as preferências do tomador de decisão (Vincke, 1989; Guitouni & Martel, 1998) e será utilizado junto àqueles critérios para os quais os resultados do **Componente 2A** servirão como respostas.

O desempenho da melhor alternativa dentro de um critério receberá uma pontuação máxima (1 ou 100) e a pior alternativa receberá pontuação zero, com as demais alternativas distribuídas proporcionalmente em uma curva de utilidade monoatributo. A soma ponderada desses desempenhos resultará na utilidade global de cada alternativa. A descrição da MAUT é oferecida na **Seção 4**.

¹ A descrição detalhada dos procedimentos para coleta e tratamento de dados a partir das rodadas de questionários da AIR é objetivo do **Produto A.3** e, portanto, não perseguida no presente relatório.

Já o método SMART, forma simplificada da MAUT, converte a importância e desempenho de diferentes atributos em números cardinais e será empregado junto aos critérios restantes (não respondidos pelo **Componente 2A**) e, portanto, com informações coletadas a partir de questionários a serem conduzidos junto aos *stakeholders* do Projeto, em que os respondentes deverão atribuir uma nota de zero a dez para cada alternativa. Trata-se de método de uso relativamente simples e compatível com quaisquer técnicas para atribuição de pesos (relativos, absolutos etc.) (Velasquez & Hester, 2013). A pontuação indicada pelos *stakeholders*, então, será convertida para escala compatível com o método MAUT, permitindo a agregação de todos os resultados em desempenhos (utilidades) globais de cada alternativa. O método SMART é melhor apresentado na **Seção 5**.

Assim, a aplicação combinada dos métodos propostos deve permitir a identificação e ponderação de critérios e, em seguida, o ranqueamento de diferentes alternativas de IPCs de acordo com seus desempenhos em cada critério. O presente produto e as seções a seguir, no entanto, possuem caráter primordialmente metodológico e são pautados pela revisão bibliográfica acerca de tais métodos. O intuito, portanto, é o de permitir maior grau de familiaridade teórica do leitor frente aos procedimentos que serão adotados na prática ao longo da condução da AMC dentro da AIR do **Projeto PMR Brasil**.

2. Analytical Hierarchy Process - AHP

As justificativas por trás da seleção dos métodos a serem empregados na Análise Multicritério, bem como do desenho mais abrangente da estratégia de implementação da AIR do **Projeto PMR Brasil**, foram oferecidas ao longo do **Produto A.1**. O objetivo da presente seção, assim como daquelas que a seguem, é o de apresentar algumas das principais características e discussões acerca dos métodos selecionados.

Já as decisões sobre como tratar e agregar as informações das diferentes etapas de consulta ao longo desse processo dependem, também, dos resultados das rodadas de questionários, e possivelmente de oficina de trabalho, ainda em andamento ou a serem realizadas e, portanto, serão retratadas, de maneira aplicada, nos **Produtos A.3 - Consolidação dos processos de consulta** e **A.4 - Aplicação da metodologia para avaliação e comparação de cenários**, dedicados ao registro dos processos de consulta e aos resultados da AIR.

Feitas essas ressalvas, e levando em consideração as características do problema merecedor de atenção no âmbito do **Projeto PMR Brasil** e sua característica multifacetada e que demanda a participação de grupo heterogêneo de *stakeholders*, cabe perguntar: qual seria um *framework* de análise capaz de envolver diferentes tomadores de decisão, com diferentes objetivos, ambições, preocupações e percepções? Tal *framework* idealmente deveria:

- ▣ Incorporar o caráter *multi-stakeholder* do processo de tomada de decisão, particularmente no caso de problemas que se revelam únicos e carentes de maior estruturação;
- ▣ Ser analítico e permitir ao analista a integração de medidas e questões tanto quantitativas quanto qualitativas, bem como das preocupações dos diferentes tomadores de decisão envolvidos com o tema em debate;
- ▣ Oferecer um processo de tomada de decisão transparente e que permita o acompanhamento e reconstrução dos diferentes passos e argumentos que, eventualmente, resultam em uma decisão;

- ▣ Ser capaz de realizar análises de sensibilidade compreensivas, de forma a investigar e explorar casos extremos e possíveis novas configurações do cenário que cerca o problema; e
- ▣ Ser flexível o suficiente para permitir sua aplicação em processos de tomada de decisão influenciados por muitos participantes com opiniões e pontos de vista divergentes (Arbel & Orgler, 1990).

Uma abordagem capaz de atender aos requisitos acima é oferecida pelo *Analytical Hierarchy Process* (Arbel & Orgler, 1990), método a ser empregado para a descoberta dos pesos dos critérios pelos quais instrumentos de precificação de carbono devem ser comparados no âmbito do **Projeto PMR Brasil**.

O AHP, proposto por Thomas L. Saaty nos anos 1970, é um dos mais modernos e bem-estabelecidos modelos de tomada de decisão (Benítez, Delgado-Galván, Gutiérrez, & Izquierdo, 2011), melhor definido como uma técnica para estabelecer prioridades em um ambiente de decisão sob múltiplos critérios (Bernasconi, Choirat, & Seri, 2014).

Tal método de comparação emparelhada (*pairwise*) de critérios e alternativas tem suas origens na psicologia, tendo em vista a maior facilidade que as pessoas possuem em expressar suas opiniões acerca de apenas duas alternativas do que simultaneamente em todos os cursos de ação possíveis; o processo de comparação em pares confere maior confiabilidade e consistência ao processo, permitindo a realização de verificação cruzada (*cross checking*) entre os pares de alternativas contrapostos (Ishizaka & Labib, 2009).

Mais do que isso, comparações diretas parecem ser necessárias para realizar a mensuração de atributos/propriedades intangíveis e que não possuem escalas ou medidas estabelecidas. Com efeito, a condução de comparações é um talento humano que permite que as pessoas não somente indiquem quais “objetos” preferem, mas também indiquem qual a intensidade da preferência por um “objeto” em detrimento de outro (Saaty, 2008). Isto é, há um apelo intuitivo por trás do emprego de método que privilegie as comparações emparelhadas.

Essas comparações formam a base do AHP que, desde sua concepção, tem sido usado em diversas aplicações relacionadas a processos de tomada de decisão multicritério (Dong, Xu, Li, &

Dai, 2008). A **Tabela 1** apresenta alguns dos exemplos mais recentes dessas aplicações². A maioria das aplicações ainda usa o AHP conforme descrito em sua publicação original, ainda que existam desenvolvimentos recentes e algumas variações (Ishizaka & Labib, 2009).

Tabela 1
Artigos Recentes com Aplicação do Método AHP

Autor	Método	Aplicação
Chen, 2006	AHP	Seleção de local para convecção
Pourghasemi, Pradhan & Gokceoglu, 2012	AHP + lógica <i>fuzzy</i>	Mapeamento de susceptibilidade a deslizamentos em bacia hidrográfica
Mahdi & Alreshaid, 2005	AHP	Seleção de método para entrega de projetos
Gerdri & Kocaoglu, 2007	AHP	Framework para mapeamento de tecnologias
Moeinaddini, Mazaher, et al, 2010	Combinação linear ponderada (WLC), AHP	Seleção de local para aterro
Stefanidis, Stathis, 2013	AHP	Avaliação do risco de inundação com base em fatores naturais e antropogênicos
Cheng & Mon, 1994	AHP + lógica <i>fuzzy</i>	Avaliação de sistemas de armas (bélicos)
Dalalah, Al-Oqla, Hayajneh, 2010	AHP	Seleção de insumos no setor de construção civil
Fong & Choi, 2000	AHP	Seleção de empreiteiro para projetos de construção
Bascetin, 2007	AHP	Seleção da melhor estratégia ambiental para recuperação de minas a céu aberto
Sinha et al., 2008	AHP	Construção de índice para análise do risco de inundações e planejamento de medidas de mitigação
Thanki, Govindan & Thakkar, 2016	AHP	Investigação do impacto e da influência de práticas <i>lean</i> e <i>green</i> no desempenho de pequenas e médias empresas na Índia
Ariff, et al, 2008	AHP	Seleção do melhor conceito de <i>design</i> em processos de desenvolvimento de produtos
Singh & Nachtnebel, 2016	AHP	Elaboração de recomendações acerca da escala (porte) mais apropriada para hidrelétricas no Nepal
Shahin & Mahbod, 2006	AHP	Nova abordagem para priorização de KPIs (<i>key performance indicators</i>) em organizações
Kurttila, et al, 2000	AHP, SWOT ⁱ	Construção de método híbrido para processos de planejamento estratégico aplicado à certificação de florestas.

i: SWOT = "Strengths", "Weaknesses", "Opportunities" e "Threats".

Fonte: elaborado pelos autores, com base em pesquisa no Google Scholar (conduzida em 03/01/2020).

Obs.: termos pesquisados: "*analytical hierarchy process ahp*". Resultados apresentados conforme "relevância"; aplicações acerca do mesmo tema/área de interesse e artigos não aplicados não foram listados na tabela.

Desde a proposição do método por Saaty (1977), diversas aplicações em processos reais de tomada de decisão foram registradas. A apresentação explícita de julgamentos acerca de

² Vaidya & Kumar (2006) analisam diversas aplicações do método AHP de acordo com os diferentes objetivos perseguidos pelo processo de tomada de decisão multicritério.

comparações emparelhadas e a possibilidade de expressá-los verbalmente aparentam contribuir para a popularidade do AHP (Costa & Vansnick, 2008), cujo artigo original já foi citado mais de 8.300 vezes no mecanismo de busca acadêmico “Google Scholar”³. Assim como outros métodos para AMCs, o AHP é baseado em quatro passos principais:

- 1) **Enquadramento do problema:** o AHP possibilita o emprego de uma estrutura hierárquica para a ponderação de critérios, facilitando a focalização, pelos usuários, dos critérios e subcritérios que contribuem para o atingimento de determinado(s) objetivo(s);
- 2) **Avaliação dos pesos:** para cada nóculo da hierarquia, uma matriz coleta e registra as comparações emparelhadas dos tomadores de decisão. Uma das forças do AHP é a possibilidade de contemplar critérios quanti e qualitativos e comparar as alternativas em uma única escala (relativa) de preferências e, portanto, não requerer a adoção de quaisquer unidades de medida nas comparações;
- 3) **Agregação dos pesos:** uma vez preenchidas as matrizes, as prioridades podem ser calculadas. O próximo passo é sintetizar as prioridades locais para todos os critérios para, então, calcular a prioridade global de cada alternativa; e
- 4) **Análise de sensibilidade:** o último passo do processo de tomada de decisão é a análise de sensibilidade, em que os insumos (dados) são ligeiramente modificados com o intuito de observar o impacto nos resultados. Caso o ranqueamento global não seja alterado, os resultados são tidos como robustos (Ishizaka & Labib, 2009).

O intuito do AHP é utilizar pesos (prioridades) para, por exemplo, decidir como alocar algum recurso escasso entre atividades concorrentes ou simplesmente implementar as atividades mais importantes, de acordo com um ranqueamento, caso pesos precisos não possam ser obtidos. Com frequência, os próprios objetivos do tomador de decisão precisam ser priorizados ou ranqueados em termos de um conjunto (superior) de outros objetivos (Saaty, 1977).

Assim, conforme mencionado acima, no AHP o problema de decisão é organizado de acordo com uma estrutura hierárquica de objetivos, critérios e subcritérios. O nível mais elevado da hierarquia é o foco do problema (objetivo da decisão), ao passo que os níveis intermediários correspondem

³ Pesquisa conduzida em 09 de janeiro de 2020.

aos critérios e subcritérios e o nível inferior contém as alternativas de decisão (Ramanathan, 2001). Caso existam múltiplos tomadores de decisão, ou seja, várias pessoas cujos julgamentos são contemplados para a decisão, então, é também possível introduzir um nível adicional na hierarquia, imediatamente abaixo do foco do problema (Ramanathan, 2001). A **Figura 1** apresenta a hierarquia preliminar para o problema de decisão do **Projeto PMR Brasil**.

Figura 1
Hierarquia Preliminar do Projeto PMR Brasil



Fonte: elaborado pelos autores, com base no **Produto A.1**.

Para cada nível da hierarquia, o procedimento de aplicação do método tem início com o(s) tomador(es) de decisão indicando, em uma escala relativa, a dominância entre qualquer um dos itens relevantes para o problema de decisão, dois a dois. Nessa etapa, normalmente, os julgamentos são tomados de maneira qualitativa e valores correspondentes são atribuídos a eles a partir de uma escala fundamental (ver **Seção 2.1**) (Saaty, 1977).

De forma geral, o método não espera encontrar consistência cardinal (absoluta) na totalidade de cada matriz de julgamentos, já que os sentimentos e percepções dos indivíduos não são geridos por alguma fórmula exata. Similarmente, não se espera consistência ordinal (relativa) plena, dado que os julgamentos das pessoas não são necessariamente transitivos. Entretanto, para aumentar a consistência dos julgamentos traduzidos para escala numérica, sempre que um valor a_{ij} é assinalado na comparação da atividade i com relação à atividade j , seu valor recíproco é assinalado para a_{ji} (Saaty, 1977).

O uso de hierarquias pelo AHP permite ao tomador de decisão/analista agrupar um número elevado de alternativas e/ou critérios em *clusters* de dimensões menores e, portanto, mais facilmente gerenciados. Nesse caso, as comparações emparelhadas são também realizadas dentro de cada *cluster* (Saaty, 1977). Tal agrupamento deve ser feito de acordo com a proximidade ou similaridade dos elementos com relação à função que desempenham ou propriedade que compartilham e contribui para aumentar: i) a eficiência das comparações emparelhadas; ii) a consistência, sob uma hipótese de limitada capacidade da mente humana em comparar mais do que 7 ± 2 elementos simultaneamente (Saaty, 1977).

Consequentemente, o procedimento de levantamento de prioridades (homogêneas e recíprocas) para cada *cluster* e nível da hierarquia em uma escala única é convenientemente armazenado em uma matriz subjetiva (A) de dimensões $n \times n$ com relações entre pares de elementos $a_{ii} = 1$ e $a_{ij} = 1/a_{ji}$, para $i, j = 1, \dots, n$ (Benítez, Delgado-Galván, Gutiérrez, & Izquierdo, 2011; Bernasconi, Choirat, & Seri, 2014). Cada matriz A, então, tem a seguinte aparência:

$$A_{AHP} = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & 1 & \dots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Vários procedimentos de priorização podem, a seguir, ser utilizados para extrair um vetor de prioridades a partir de A (ver **Seção 2.2**). Isto é, para cada par de itens i e j de um conjunto de dimensão n , o tomador de decisão obtém uma razão w_i/w_j , com $w_1 > 0, \dots, w_n > 0$ (Bernasconi, Choirat, & Seri, 2014). Nesse sentido, em processos de tomada de decisão, as escalas de prioridade são derivadas de maneira objetiva após o levantamento de julgamentos subjetivos (Saaty, 2008).

Se o nível mais alto da hierarquia consiste em apenas um objetivo, então as multiplicações das prioridades a partir de cada nível inferior resultarão em vetor único de pesos que indicará as prioridades relativas das alternativas (dispostas no nível mais baixo) para alcançar o objetivo da decisão. Os pesos derivados de uma matriz de comparações emparelhadas são chamados de “pesos locais” com relação a algum critério ou propriedade (nível imediatamente superior); depois de ponderados pelos pesos desse critério em cada nível da hierarquia até o nível mais alto, resultam nos “pesos globais” de cada alternativa (Zhu & Dale, 2001). Se apenas uma decisão é necessária ou uma alternativa deve ser adotada, está será aquela com o maior peso global, caso contrário, o

tomador de decisão pode optar por distribuir seus recursos para cada alternativa proporcionalmente aos seus pesos relativos (Saaty, 1977).

Nota-se, pelo uso de pesos relativos distintos, que o AHP é uma técnica compensatória de AMC, uma vez que permite *trade-offs* entre os diferentes elementos da estrutura de decisão. Dessa maneira, a técnica oferece um arranjo ideal para análises de impactos ambientais, as quais envolvem dilemas entre variados objetivos ambientais e socioeconômicos. Outros métodos de AMC, tais como o MAUT, também podem e são aplicados em situações similares (Ramanathan, 2001), assim como previsto na estratégia preliminar de implementação da AIR do Projeto PMR Brasil (**Produto A.1**).

Outra vantagem do método reside no fato que sua utilização não necessita da participação de muitos “avaliadores”/tomadores de decisão para que seja possível chegar em pesos precisos. Adicionalmente, ao incluir mais de duas alternativas em um problema de decisão, o AHP facilita a obtenção de valores mais precisos em decorrência da redundância nas comparações, que contribui para melhorar a acurácia dos julgamentos (Saaty, 2008). Todavia, o processo se torna muito demorado quando um número elevado de alternativas é avaliado (Baumbach, 2008).

De fato, o número de observações a serem feitas aumenta com o quadrado do número de alternativas (Baumbach, 2008). Por exemplo, para comparar oito alternativas com base em um único critério, são necessários 28 julgamentos emparelhados (para cada juiz/tomador de decisão) (Ramanathan, 2001). Por essa razão, alguns autores recomendam a consideração de no máximo cinco alternativas (Baumbach, 2008). Similarmente, também em virtude desse motivo, o AHP não será adotado para todo o processo de AIR no Projeto PMR Brasil, ficando restrito à ponderação dos critérios (agrupados em *clusters*), não sendo adotado para a pontuação das alternativas, cujos métodos são explorados nas **Seções 4 e 5**.

Destaca-se, por fim, que a qualidade e aplicabilidade dos resultados do AHP dependem fortemente da hierarquia que é concebida e estrutura o problema de decisão. Uma hierarquia que é construída “sob medida” e conjuntamente com os *stakeholders* deve servir melhor aos seus propósitos. Posto de outra forma, a preparação da hierarquia pode ser considerada a parte mais importante da análise (Arbel & Orgler, 1990). Uma vez que a hierarquia é claramente delineada, o processo de priorização é rápido e direto.

Decisões que necessitam de ferramentas e métodos de suporte são inerentemente complicadas e, conseqüentemente, complexas de modelar. Algum *trade-off* entre refinamento e precisão da modelagem e facilidade de uso do método deve ser alcançado e o AHP parece ter conseguido encontrar nível satisfatório de comprometimento, tornando-se útil para casos bastante diversos e extrapolando as fronteiras da comunidade acadêmica para ser amplamente empregado na prática (Ishizaka & Labib, 2009).

De fato, o AHP foi desenvolvido com a preocupação de auxiliar as pessoas em processos de tomada de decisão de acordo com suas próprias preferências e entendimentos, de maneira descritiva e consideravelmente transparente (Saaty, 2005). Isto é, o método foi concebido para captar os sentimentos mesmo de pessoas leigas e convertê-los para uma escala que consegue refletir seus raciocínios e modos de pensar (Ramanathan, 2001). Essa escala de julgamento é foco do primeiro de uma série de tópicos que detalham os passos necessários para a aplicação do AHP.

2.1 Escala de Julgamento

Saaty (2008) faz a distinção entre dois tipos de topologia na matemática:

- ▣ **Topologia métrica:** preocupada com a quantidade de determinado atributo que algum elemento possui conforme medido em uma escala com uma origem e uma unidade arbitrária, aplicada de maneira uniforme para medir todos os “objetos” com relação a tal propriedade/atributo. Comumente, propriedades métricas pertencem à mensuração de atributos do mundo “físico” em campos de conhecimento como física, astronomia, engenharia e, eventualmente, economia.

- ▣ **Topologia ordinal:** preocupada com a mensuração da dominância de um elemento sobre outros com respeito a algum atributo em comum. Propriedades de ordem pertencem ao mundo “mental” e estão relacionados às suas ocorrências conforme valores humanos, preferências e estimativas de probabilidades e, portanto, sempre necessitam de julgamento prévio às etapas de mensuração. Os resultados da mensuração são reduzidos a e conhecidos como prioridades (Saaty, 2008).

De qualquer forma, independente da natureza do problema a ser enfrentado, os melhores argumentos em defesa de determinada escala são aqueles que demonstram sua capacidade de

reproduzir resultados já conhecidos em quaisquer áreas para às quais já exista alguma outra escala objetiva, como na física e, por vezes, na economia (Saaty, 1977).

No AHP, a derivação das prioridades dos critérios (e das alternativas) requer que um número, denominado w_{ij} , seja assinalado para cada par de julgamentos (x_i, x_j) , representando, na opinião do juiz J, a razão de prioridade do elemento dominante (x_i) relativa à prioridade do elemento dominado (x_j) (Saaty, 1977).

Nesse sentido, e reconhecendo os experimentos a partir da psicologia que demonstram que um indivíduo não pode simultaneamente comparar mais do que sete “objetos” (mais ou menos dois), sem ficar confuso, Saaty (1977) propôs a adoção de uma escala que permita a diferenciação unitária entre valores sucessivos e tenha no máximo 7 + 2 valores. Assim, partindo de $x_1 = 1$ para uma comparação idêntica, segue-se que a escala para o AHP deve variar entre 1 e 9 (Saaty, 1977).

Dessa maneira, o avaliador A pode ser convidado a comparar os elementos de forma emparelhada e expressar seus julgamentos de duas maneiras⁴:

- **Numericamente**, atribuindo diretamente um número entre 1 até, porém não incluindo, 10.
 - Por exemplo, se o juiz deve escolher entre dois carros x_1 e x_2 e julga que o primeiro é seis vezes mais confortável que o segundo, então $w_{12} = 6$;

- **Verbalmente**, escolhendo alguma expressão que demonstre a relação entre os elementos, como “igualmente importantes”; “dominância moderada sobre o outro elemento”; ou “dominância extrema sobre o outro elemento” (ver **Tabela 2** para a escala completa). Cada comparação emparelhada verbal é, então, automaticamente convertida para um número, conforme exposto na **Tabela 2**.
 - Por exemplo, caso o avaliador julgue que, para os dois carros x_3 e x_4 , o primeiro é moderadamente mais confortável que o segundo, então $w_{34} = 3$ (Costa & Vansnick, 2008).

⁴ Uma terceira possibilidade seria a adoção de uma escala gráfica (Ishizaka & Labib, 2009).

Tabela 2

Conversão de Julgamentos Verbais para Números (escala fundamental)

Definição (expressões verbais)	Intensidade de importância	Explicação
Igual importância	1	Dois elementos contribuem igualmente para o objetivo.
Dominância ligeira ou fraca	2	
Dominância moderada	3	Experiência e julgamento favorecem um pouco mais um elemento sobre o outro.
Dominância moderada <i>plus</i>	4	
Dominância forte	5	Experiência e julgamento favorecem fortemente um elemento sobre o outro.
Dominância forte <i>plus</i>	6	
Dominância muito forte ou demonstrada	7	Um elemento é muito fortemente favorecido sobre o outro; sua dominância é demonstrada na prática.
Dominância muito, muito forte	8	
Dominância extrema	9	A evidência favorecendo um elemento sobre o outro é da mais intensa ordem de afirmação.
Quando elementos são muito próximos, uma casa decimal é adicionada para indicar sua diferença, conforme apropriado.	1.1 - 1.9	Premissa lógica.

Fonte: Saaty (2008).

A expressão dos julgamentos de forma verbal é a abordagem mais comumente adotada. Com efeito, o uso de comparações verbais é intuitivamente atrativo, torna o método amigável, de fácil aplicação e mais próximo das realidades diárias das pessoas do que a comparação com números, além de permitir alguma ambiguidade (caso desejável) em comparações não triviais (Ishizaka & Labib, 2009).

Em teoria, no entanto, não há razão para ficar restritos a esses números e gradação verbal (Ishizaka & Labib, 2009). Ou seja, tendo uma matriz de comparações emparelhadas construída pelo tomador de decisão, a escolha e aplicação de qualquer escala que converta tal matriz, a partir de alguma função definida, resulta em uma matriz de comparações emparelhadas numéricas passível de tratamento pelo AHP (Dong, Xu, Li, & Dai, 2008).

Ainda assim, de maneira menos formal, Saaty (2008) argumenta que os indivíduos são capazes de escolher ordinalmente entre elementos caracterizando-os em um primeiro nível como tendo um desempenho alto, médio ou baixo; em um segundo nível, igualmente, são capazes de fazer a mesma distinção entre alto, médio e baixo, combinando para nove categorias em dois níveis de análise. Dessa forma, o valor 1 é assinalado para a combinação baixo, baixo (menor valor possível) e o valor 9 é assinalado para a combinação alto, alto (maior possível), cobrindo todo o espectro de possibilidades entre dois níveis de análise.

De qualquer forma, Harker & Vargas (1987) indicam que a escolha de uma escala numérica para o AHP é uma questão de pesquisa aberta, com outras escalas, como a geométrica, sendo oferecidas como alternativas à escala proposta por Saaty⁵. A escala de Saaty tem sido apoiada pela evidência empírica oferecida pelo próprio Saaty, mas não é uma escala transitiva. A escala geométrica é tida como transitiva, porém é difícil determinar seus parâmetros (Saaty, 1998, apud Dong, Xu, Li, & Dai, 2008). A escolha da “melhor” escala, então, é fruto de um debate intenso, sendo sugerido que a opção por uma em específico depende do problema de decisão e dos indivíduos envolvidos (Harker & Vargas, 1987). De qualquer forma, o mais importante é que a partir do processo de levantamento dos julgamentos surja uma matriz positiva e recíproca, em que cada elemento x_1, x_2, \dots, x_n é assinalado para uma linha e uma coluna e a matriz possa ser preenchida ao inserir o número correspondente na interseção da linha de x_i com a coluna de x_j , de forma que a célula contenha:

- ▣ w_{ij} , caso x_i domine x_j ;
- ▣ $1/w_{ij}$, caso x_j domine x_i ; e
- ▣ 1, caso x_i não domine x_j e x_j não domine x_i (Costa & Vansnick, 2008).

2.2 Métodos para Derivar Prioridades

No AHP, priorização é o processo de computar o vetor de prioridades (pesos) a partir da matriz de julgamentos numéricos emparelhados. Choo & Wedley (2004) identificaram dezoito métodos distintos para tal processo. Retomando alguns conceitos básicos, e necessários para a derivação das prioridades, uma matriz é considerada consistente caso obedeça duas regras:

- ▣ **Regra da transitividade:** respeitada se $a_{ij} = a_{ik} \cdot a_{kj}$; e
- ▣ **Regra da reciprocidade:** respeitada se $a_{ij} = 1/a_{ji}$;

Em que i, j e k são quaisquer elementos da matriz.

Em uma matriz perfeitamente consistente, todas as comparações a_{ij} obedecem à igualdade $a_{ij} = p_i/p_j$, em que p_i é a prioridade do elemento i . Cada método apresentado a seguir chega a resultados

⁵ Outras escalas, como a escala Ma-Zheng e a escala Salo-Hamalainen são exploradas em Dong et al. (2008).

idênticos quando se trata de matrizes consistentes (Ishizaka & Lusti, 2006)⁶. Aqui apresentam-se os três métodos mais comumente empregados para derivar prioridades no AHP: i) média dos valores normalizados (média das linhas); ii) abordagem via autovalores; e iii) média geométrica.

Média dos valores normalizados⁷

Esse é o método mais antigo para derivação de prioridades e é baseado em apenas três passos:

- 1) Soma dos elementos na coluna j;
- 2) Normalização da coluna j;
- 3) Cálculo da média da linha i.

Demonstração: Todos os elementos da coluna j de uma matriz de comparações emparelhadas são somados, ou seja:

$$\frac{p_1}{p_j} + \dots + \frac{p_i}{p_j} + \dots + \frac{p_n}{p_j} = \frac{\sum_{i=1}^n p_i}{p_j}$$

O valor normalizado é calculado ao dividir a comparação $a_{ij} = p_i/p_j$ pelo resultado da soma acima:

$$\frac{p_i/p_j}{\frac{\sum_{i=1}^n p_i}{p_j}} = \frac{p_i}{p_j} \cdot \frac{p_j}{\sum_{i=1}^n p_i} = \frac{p_i}{\sum_{i=1}^n p_i}$$

A prioridade de i é, então, a média dos elementos encontrados acima para a linha i:

$$\left(\frac{p_i}{\sum_{i=1}^n p_i} + \dots + \frac{p_i}{\sum_{i=1}^n p_i} \right) \cdot \frac{1}{n} = \frac{n \cdot p_i}{\sum_{i=1}^n p_i} \cdot \frac{1}{n} = \frac{p_i}{\sum_{i=1}^n p_i}$$

Um exemplo numérico da aplicação desse método é oferecido no **Produto A.1**. Para o método das médias dos valores normalizados não existe abordagem matemática possível para lidar com matrizes inconsistentes.

⁶ Quando a matriz contém inconsistências, duas principais abordagens são possíveis: a teoria da perturbação e a minimização da distância (Ishizaka & Lusti, 2006). Esses procedimentos serão estudados e descritos caso necessários para o avanço dos trabalhos do Projeto PMR Brasil, portanto, uma vez que os resultados das rodadas de questionários sejam obtidos.

⁷ Esse tópico é baseado em Ishizaka & Lusti (2006), exceto quando explicitamente indicado.

Abordagem via autovalor⁸

Saaty (1977) propõe o uso do autovetor principal \vec{p} como o vetor das prioridades desejadas. Tal vetor é calculado conforme a seguinte equação:

$$A \cdot \vec{p} = \lambda \cdot \vec{p}$$

Em que:

- ▣ A é a matriz de comparação;
- ▣ \vec{p} é o vetor de prioridades;
- ▣ λ é o autovalor máximo.

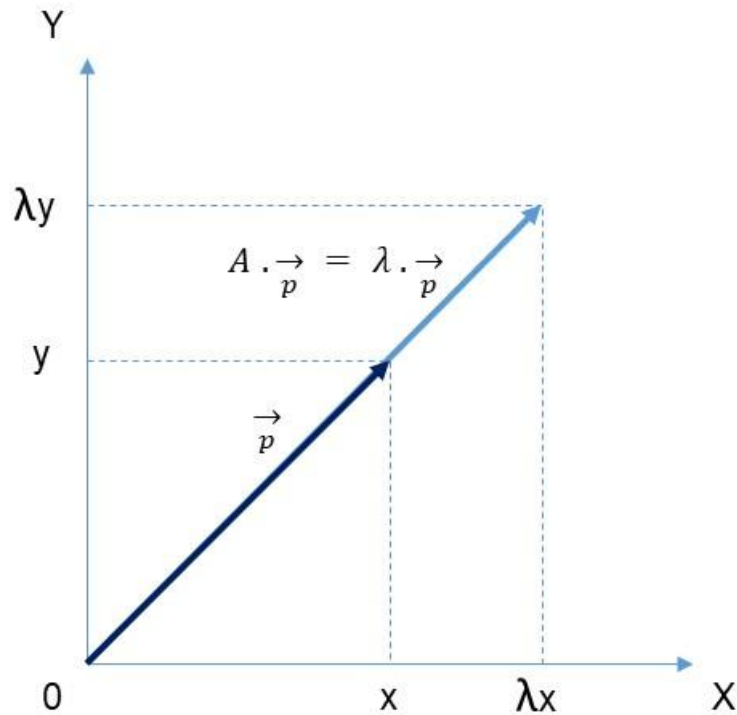
O autovetor de uma transformação linear é um vetor, não nulo, que é alterado (redimensionado) no máximo por um fator numérico (o autovalor) quando sujeito a tal transformação linear. Em termos geométricos, o autovetor aponta para uma direção em que é “esticado” (por um fator igual ao autovalor) pela transformação linear (Burden & Faires, 1993), conforme exposto na **Figura 2**.

Na **Figura 2** nota-se, por exemplo, como a matriz A age ao “esticar” o vetor de prioridades \vec{p} , porém sem alterar a direção do vetor. Logo, \vec{p} é um autovetor de A. O objetivo do método, portanto, é encontrar o maior autovalor da matriz A, ou seja, o maior escalar que pode esticar o vetor de prioridades sem alterar sua direção.

⁸ Idem 7.

Figura 2

Representação Geométrica de Autovalor e Autovetor



Fonte: Elaborado pelos autores com base em Antonov (2008).

Demonstração: Quando se multiplica uma matriz consistente pelo vetor de prioridades $p = (p_1; \dots; p_i; \dots; p_n)$, obtém-se:

$$Ap = np$$

Onde:

- ▣ $p = (p_1; \dots; p_i; \dots; p_n)$; e
- ▣ n = dimensão da matriz A.

Saaty (1977) também defende o uso da abordagem via autovalor para matrizes ligeiramente inconsistentes, com o emprego da teoria da perturbação, que sustenta que pequenas variações nos insumos, nos valores de a_{ij} , implicam ligeiras variações no autovetor e no autovalor. O método do autovalor é, no entanto, menos transparente que os demais métodos e diversos autores destacam a falta de clareza do processo via autovalor.

Média geométrica⁹

O vetor de médias geométricas, também chamado de método dos mínimos quadrados logarítmicos, comumente adotado em procedimentos estatísticos, satisfaz os critérios de transitividade e reciprocidade e, em alguns estudos empíricos, apresenta um desempenho melhor do que a abordagem via autovalor com relação à preservação dos ranqueamentos ordinais.

Dadas duas matrizes de julgamento de dimensões $n \times n$ $A = [a_{ij}]$ e $C = [c_{ij}]$, define-se:

$$m(A, C) = \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j>1} [\ln a_{ij} - \ln c_{ij}]^2 \right)^{1/2}$$

É possível verificar que m satisfaz a desigualdade triangular e é uma métrica no espaço das matrizes de julgamento $n \times n$. Ou seja é uma métrica para qual $m(i, j) \leq m(i, z) + m(z, j)$ para quaisquer i, j e z . Assim, Crawford & Williams (1985) demonstram que para qualquer matriz A de dimensões $n \times n$, existe uma matriz consistente C que é a mais próxima de A de acordo com a métrica m . Tal matriz consistente é dada por $c_{ij} = v_i/v_j$, onde:

$$v_i = \prod_{j=1}^n a_{ij}^{\frac{1}{n}}$$

Isto é, v_i é a média geométrica dos elementos da i -ésima linha de A . O vetor v , devidamente normalizado, é, então, utilizado como a estimativa da escala de razões correspondente a A . Por exemplo, para uma matriz A de dimensão 3×3 :

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a & b \\ 1/a & 1 & c \\ 1/b & 1/c & 1 \end{pmatrix}$$

Então, o vetor de médias geométricas para A é:

⁹ Esse tópico é baseado em Crawford & Williams (1985), exceto quando explicitamente indicado.

$$v = \begin{pmatrix} (ab)^{1/3} \\ (c/a)^{1/3} \\ (1/bc)^{1/3} \end{pmatrix}$$

Em que cada v_i corresponde ao peso (ou prioridade) de um elemento i , de determinado nível da hierarquia de decisão.

Esse método possui como vantagem ser insensível a uma inversão da escala: a média geométrica das linhas e das colunas oferece o mesmo ranqueamento, o que não necessariamente ocorre com a abordagem via autovalor. Saaty (1990, *apud* Ishizaka & Lusti, 2006) critica o método ao não enxergar qualquer justificativa conceitual para trabalhar com uma escala logarítmica. De qualquer forma, a média geométrica pode ser calculada facilmente e tem sido adotada e apoiada por grande proporção da comunidade de praticantes do AHP.

Considerações gerais acerca dos métodos de derivação de prioridades

De acordo com Saaty (2003, p. 86, *apud* Costa & Vansnick, 2008), o vetor de prioridades possui dois significados: i) oferecer um ranqueamento numérico das alternativas/critérios que indique uma ordem de preferência entre eles; e ii) oferecer ordenamento que também reflita a intensidade ou preferência cardinal conforme indicado pelas razões dos valores numéricos.

Esse segundo significado é visto por alguns autores como requerendo que tais razões preservem a ordem das intensidades das preferências conforme indicadas pelos juízes/tomadores de decisão, algo não necessariamente observado pelos vetores de prioridade obtidos a partir da abordagem de autovalor (Costa & Vansnick, 2008).

Independentemente das vantagens e limitações de cada método, mesmo para matrizes não perfeitamente consistentes, experimentos indicam que as diferenças nos resultados obtidos a partir de cada um deles são muito pequenas, imperceptíveis até a terceira casa decimal, independentemente do tamanho da matriz (Bernasconi, Choirat, & Seri, 2014).

Ou seja, apesar de existir uma discussão intensa na literatura sobre qual seria o “melhor” método para derivar prioridades no AHP, tal discussão parece inútil, já que estudos experimentais mostram que cada método é superior de acordo com algum parâmetro específico, porém nenhum é ótimo para todos ou para a maioria dos possíveis parâmetros de interesse (Ishizaka & Lusti, 2006). Em

resumo, não surgem diferenças entre esses métodos quando são realizadas diversas simulações hipotéticas (Ishizaka & Labib, 2009).

Mesmo para matrizes inconsistentes e de dimensões maiores, as diferenças de resultados são ínfimas, inclusive para o método das médias dos valores normalizados, para o qual não existe qualquer fundamentação teórica para aplicação junto a esse tipo de matriz. Apenas prioridades muito próximas podem sofrer de contradições no ranqueamento e o número de contradições nesses casos tende a crescer quanto maiores as inconsistências e a dimensão da matriz (Ishizaka & Lusti, 2006).

2.3 Agregação ou Síntese

O processo de síntese dos resultados no método AHP é desenvolvido ao multiplicar o vetor de prioridades das alternativas pelo peso correspondente de cada critério e somar os resultados para obter a composição final das prioridades das alternativas com respeito ao objetivo da decisão. O valor mais alto desse vetor final de prioridades indica qual alternativa é a melhor ranqueada (Srdjevic & Srdjevic, 2013).

Caso as alternativas devam ser comparadas de acordo com múltiplos critérios, o AHP sugere que uma hierarquia seja construída com o objetivo geral no topo, as alternativas na base e os critérios nos níveis intermediários. O procedimento de multiplicação do desempenho das prioridades pelo peso dos critérios e posterior adição é, então, repetidamente aplicado de baixo para cima, isto é:

- ▣ Calcula-se um vetor de prioridades para as alternativas com relação a cada critério situado no nível intermediário mais próximo da base;
- ▣ Calcula-se um vetor de pesos para cada *cluster* de critérios ao longo dos diferentes níveis da hierarquia; e
- ▣ Toda a informação dos julgamentos, então, é sintetizada de baixo para cima por sucessivos processos de agregação aditiva, resultando num vetor final de prioridades globais para as alternativas (Costa & Vansnick, 2008).

A abordagem original e histórica do AHP, chamada de modo distributivo, emprega um processo de agregação aditiva, com a normalização da soma das prioridades locais para uma escala unitária (Ishizaka & Labib, 2009):

$$p_i = \sum_j w_j \cdot l_{ij}$$

Em que:

- ▣ p_i = prioridade global da alternativa i ;
- ▣ l_{ij} = prioridade local;
- ▣ w_j = peso do critério j .

Alternativamente, o modo “ideal” usa a normalização dividindo o escore de cada alternativa somente pelo escore da melhor alternativa sob cada critério. As duas abordagens não necessariamente resultam no mesmo ranqueamento (Ishizaka & Labib, 2009).

Para os casos em que as prioridades já são conhecidas *a priori*, apenas o modo distributivo consegue recuperar essas prioridades (Vargas, 1997). Entretanto, se a cópia de uma alternativa (ou uma “quase cópia”) é introduzida ou removida da comparação, uma reversão no ranqueamento final pode surgir (Ishizaka & Labib, 2009). O problema de reversão do ranqueamento não é exclusivo do AHP, mas de todos os modelos baseados na agregação aditiva (Wang & Luo, 2009).

Millet & Saaty (2000, *apud* Ishizaka & Labib, 2009) oferecem sugestões sobre qual procedimento de normalização adotar dependendo do contexto do problema de decisão. Em um sistema fechado, em que nenhuma alternativa será adicionada ou removida, então, o modo distributivo deve ser empregado.

Em um sistema aberto, em que alternativas podem ser adicionadas ou suprimidas, e em que é aceito que as preferências entre duas alternativas dependam também das demais, ou seja aceite-se o fenômeno da reversão de ranqueamento, novamente o modo distributivo é o mais indicado. Porém, caso o sistema seja aberto, mas não se aceite que outras alternativas afetem o resultado das comparações emparelhadas, então, o modo “ideal” é recomendado (Ishizaka & Labib, 2009).

2.4 Decisão em Grupos

Quando o AHP é aplicado para decisões em grupo, surgem diversas questões normativas e comportamentais, inclusive acerca de considerações sobre: i) a natureza da formação do grupo; ii) a natureza das relações entre os membros do grupo; iii) o nível de agregação; e iv) os métodos de obtenção de médias (Bernasconi, Choirat, & Seri, 2014).

Em algumas situações, é natural assumir que todos os *stakeholders* que concordam em participar do processo de tomada de decisão e agir como um grupo também aceitam possuir igual importância para os resultados do processo. Em outros contextos, no entanto, as opiniões dos membros do grupo podem ser vistas como tendo importâncias diferentes. Nesses casos, é possível utilizar pesos para medir a relevância e a contribuição de cada membro (Bernasconi, Choirat, & Seri, 2014). Com efeito, mesmo em procedimentos guiados pelo consenso, é razoável supor que aqueles com maior nível de conhecimento, experiência, sensibilidade ou poder no assunto em debate devem influenciar mais fortemente o resultado da decisão (Saaty, 2008).

A distinção entre os membros do grupo e a importância de suas contribuições pode, por exemplo, ser realizada por uma fonte externa, também chamada de “supra tomador de decisão” (Ramanathan & Ganesh, 1994). Quando tal fonte não existe, é possível usar o próprio AHP para determinar os pesos de prioridades para os membros do grupo.

O problema, então, passa a residir na decisão sobre quem deveria oferecer os julgamentos para obter os pesos dos membros. Se os próprios membros devem fazê-lo, a questão nada trivial é a de indicar os pesos para esse meta-problema (Forman & Peniwati, 1998). Uma opção é assumir pesos equivalentes apenas nesse nível superior do problema de decisão (Bernasconi, Choirat, & Seri, 2014).

De qualquer forma, existem duas possibilidades principais para a agregação dos julgamentos de cada indivíduo envolvido em um processo de decisão coletiva: i) completar uma matriz A (de comparações emparelhadas) para cada avaliador; ou ii) calcular uma única matriz a partir das médias dos escores ofertados por cada avaliador (Baumbach, 2008). Posto de outra forma, a agregação do grupo pode ser feita em dois níveis:

- **Agregação das Prioridades Individuais (AIP, na sigla em inglês):** consiste, primeiramente, no cálculo dos pesos individuais $u(k)$ para cada $A(k)$ e, posteriormente, na obtenção do vetor agregado u a partir desses pesos.

- Aqui, o grupo é visto como uma coleção de agentes independentes que mantêm suas identidades próprias.

- ▣ **Agregação dos Julgamentos Individuais (AIJ, na sigla em inglês):** consiste na agregação das matrizes individuais de comparação $A(k)$, para cada juiz k , em uma matriz de julgamento A válida para o grupo como um todo e, então, no cálculo do vetor de prioridades para o grupo a partir dessa matriz;
 - Aqui, o grupo é tido como uma espécie de “novo indivíduo”, diferente da simples coleção de todos os seus membros (Bernasconi, Choirat, & Seri, 2014; Forman & Peniwati, 1998).

No contexto da AIJ, o principal método de agregação é o das médias geométricas ponderadas (WGM, na sigla em inglês), baseado no cálculo das médias geométricas ponderadas de cada elemento a partir das matrizes de comparação emparelhadas. No contexto da AIP, os vetores de prioridades $u(k)$, para cada juiz k , são obtidos antes e só depois são agregados (Bernasconi, Choirat, & Seri, 2014).

Nesse segundo caso, então, é possível adotar uma abordagem que utilize as informações provenientes de todos os membros do grupo ou restringir a agregação e calcular as médias dos vetores de prioridades usando apenas os dados daqueles juízes que atribuíram pontuações para as alternativas/critérios de maneira consistente (Baumbach, 2008) (ver discussão na **Seção 2.5** a seguir).

Alternativamente, ao invés de agregar julgamentos individuais (AIJ) ou vetores de prioridades derivados individualmente (AIP), alguns autores sugerem realizar uma síntese dos melhores vetores locais de prioridade, obtidos a partir dos tomadores de decisão mais consistentes, chegando a um grupo final de prioridades que é objetivamente o melhor possível (em termos de consistência) (Srdjevic & Srdjevic, 2013).

De qualquer maneira, a escolha do melhor nível para realizar a agregação dos julgamentos de um grupo de juízes/tomadores de decisão parece ter pouca relevância para os resultados encontrados empiricamente quando se emprega o método das médias geométricas ponderadas como procedimento para a junção das informações (Bernasconi, Choirat, & Seri, 2014). Mais do que isso,

em um processo de decisão coletiva, tanto consistência quanto consenso são metas a serem perseguidas, e algum balanço entre ambos é desejável (Srdjevic & Srdjevic, 2013).

2.5 Consistência

O AHP faz uso de um “teste de consistência” para prevenir que prioridades sejam aceitas se o nível de inconsistência nos julgamentos é elevado (Costa & Vansnick, 2008). A consistência da matriz de julgamentos pode ser determinada a partir de uma medida chamada “razão de consistência” (CR, na sigla em inglês), definida como:

$$CR = CI / RI$$

Em que:

- ▣ CI é o índice de consistência; e
 - ▣ $CI = (\lambda_{max} - n) / (n - 1)$;
 - ▣ λ_{max} é o máximo autovalor da matriz A.

- ▣ RI é o índice aleatório (ver abaixo).

O índice aleatório (RI, na sigla em inglês) é a média do índice de consistência de milhares de matrizes recíprocas geradas aleatoriamente a partir da escala fundamental (de 1 a 9), com as entradas recíprocas obtidas de maneira intencional e forçada (Ramanathan, 2001; Costa & Vansnick, 2008)¹⁰. Quanto maior a razão de consistência (CR), menos consistentes os julgamentos que serviram de insumo para a construção da matriz e, portanto, menos confiáveis os resultados. Geralmente, uma CR até 0,10 é considerada como aceitável (Ramanathan, 2001). Ou seja, se um avaliador é consistente, então, este deveria obter um CI menor do que aquele produzido por *inputs* aleatórios.

Posto de outra forma, se as comparações emparelhadas são perfeitamente consistentes, então λ_{max} é igual à dimensão da matriz e o índice de consistência é zero. Quanto maior a inconsistência entre as comparações, maior o máximo autovalor e maior o índice de consistência (que, na verdade, mede o grau de inconsistência) (Wedley, 1993).

¹⁰ Os valores de RI para matrizes de tamanho 1, 2, ..., 10 podem ser encontrados em Saaty (2005).

Tendo em vista que processos de tomada de decisão baseados no AHP têm início com a coleta de informações junto aos *stakeholders* e, conseqüentemente, que a matriz de comparação representa o conhecimento e as opiniões desses *stakeholders*, existe uma probabilidade não negligenciável de que tal matriz apresente uma CR inaceitável de acordo com os critérios de Saaty, requerendo sucessivas rodadas de ajuste dos julgamentos (Benítez, Delgado-Galván, Gutiérrez, & Izquierdo, 2011).

Se a CR é, de fato, mais alta do que o desejável, é possível adotar o seguinte procedimento:

- 1) Achar o julgamento mais inconsistente na matriz;
 - a. Por exemplo, aquele com o maior erro ($\epsilon_{ij} = a_{ij}w_j/w_i$).
- 2) Determinar o intervalo de valores para os quais aquele julgamento pode ser alterado de forma a reduzir a inconsistência;
- 3) Perguntar ao(s) juiz(es) se pode(m) mudar seu(s) julgamento(s) para um valor plausível, dentro daquele intervalo (Saaty, 2008).

Ao passo que consistência quase perfeita é uma propriedade normativa claramente desejável de ser observada em matrizes de resposta para as quais as perturbações são pequenas, o inverso não é necessariamente verdadeiro. Uma matriz de comparação emparelhada pode ser perfeitamente consistente, mas “irrelevante e distante da marca do verdadeiro vetor de prioridade” (Saaty, 2003, p. 86, *apud* Bernasconi, Choirat, & Seri, 2014).

Em teoria, uma matriz simétrica e recíproca satisfaz a propriedade de consistência cardinal se, para quaisquer três razões de julgamentos a_{ij} , a_{il} e a_{lj} , a seguinte relação é verdadeira: $a_{ij} = a_{il} \times a_{lj}$. Na prática, consistência cardinal é violada pelos indivíduos devido a erros, por exemplo, de arredondamento ou de outros eventos imprevisíveis (Bernasconi, Choirat, & Seri, 2014).

Desde Saaty (1977), uma extensa literatura tem proposto diversas alternativas para o cálculo de índices de consistência com o intuito de avaliar a qualidade dos julgamentos relativos, tanto para decisões individuais quanto coletivas. Entretanto, consistência é apenas uma *proxy* para a qualidade desses julgamentos.

Algumas medidas mais gerais e aplicáveis a todos os métodos para derivar prioridades, e não somente para a abordagem via autovalor, têm sido propostas, como a distância euclidiana generalizada e o critério de violações mínimas, que indica a ocorrência de reversão de ordem (Golani & Kress, 1993). Essas medidas avaliam tanto a acurácia da solução, quanto as propriedades de ranqueamento ordinal, sendo amplamente aceitas e utilizadas por pesquisadores que trabalham com o AHP (Srdjevic & Srdjevic, 2013).

Conforme mencionado previamente, algumas abordagens podem ser empregadas para construir uma matriz consistente a partir de uma inconsistente (ver, por exemplo, as sugestões de Benítez, Delgado-Galván, Gutiérrez, & Izquierdo, 2011). Entretanto, a nova matriz pode ser vista pelos juízes como refletindo apenas parcialmente suas opiniões e, eventualmente, sendo alvo de novas revisões. Nesses casos, é importante buscar algum nível razoável de comprometimento entre consistência e aderência ao conhecimento dos juízes (Benítez, Delgado-Galván, Gutiérrez, & Izquierdo, 2011).

De qualquer forma, algumas perguntas com relação à consistência permanecem abertas e passíveis de debate, tais como: i) qual o nível a partir do qual uma matriz deve ser declarada inconsistente?; ii) esse nível deve depender do tamanho da matriz?; iii) como adaptar a definição de consistência quando se emprega outra escala de julgamento? (Ishizaka & Labib, 2009).

Discussões acerca de consistência no âmbito do **Projeto PMR Brasil** acontecerão conforme a necessidade, uma vez encontradas as matrizes de comparações para cada *cluster* de critérios na estrutura hierárquica do problema de decisão do Projeto.

2.6 Limitações e Críticas

Apesar de sua vasta aplicação junto a processos de tomada de decisão, o AHP é alvo de críticas devido a algumas de suas fraquezas teóricas. Os três questionamentos mais frequentes com relação ao método dizem respeito: i) ao problema de reversão de ordem (discutido na **Seção 2.3**); ii) à abordagem para derivação de prioridades com base no autovalor (**Seção 2.2**); e iii) à escala de julgamento adotada (**Seção 2.1**) (Ishizaka & Lusti, 2006).

A primeira preocupação diz respeito a alterações inesperadas e “ilegítimas” no ranqueamento das alternativas, conhecida como reversão de ranqueamento, em decorrência de mudanças na

estrutura da decisão. Todavia, a ordem das alternativas pode e deve mudar sob condições mais gerais e os critérios, por vezes, aparentam não ser tão independentes entre si e independentes das alternativas apresentadas (Saaty, 2008). De qualquer forma, a busca por abordagens que consigam preservar o ranqueamento das alternativas, mesmo quando alternativas irrelevantes (como cópias ou quase cópias) são introduzidas no problema de decisão, resultou, por exemplo, na proposta de derivação de prioridades a partir médias geométricas e também na síntese dos resultados pelo uso de outros modelos que não o aditivo (distributivo) (Saaty, 2008).

Já as críticas com relação ao uso da escala fundamental de julgamento existem a despeito de suas bases teóricas e das diversas comparações com outras escalas, inclusive para casos e exemplos para os quais a resposta já era conhecida (Saaty, 2008). Realmente, conforme mencionado previamente, a escolha de uma escala apropriada tende a depender das pessoas envolvidas e do problema de decisão (Harker & Vargas, 1987).

Por fim, existem menções na literatura acerca da incorporação de erros de julgamento pelo AHP, passíveis de divisão em dois tipos ou classes:

- **Tipo 1:** Julgamentos consistentes, prioridades imprecisas. Ocorrem quando a razão de consistência é baixa, mas as prioridades encontradas não aparentam ser precisas (não são percebidas como aderentes à realidade);
- **Tipo 2:** Julgamentos inconsistentes, prioridades aparentemente precisas. Ocorre quando a razão de consistência é inaceitavelmente elevada, mas as prioridades encontradas aparentam precisão (percebidas pelos avaliadores como aderentes à realidade) (Baumbach, 2008).

Os erros do tipo 1 podem ser atribuídos aos vieses dos juízes com relação a algum padrão ou atributo das alternativas e tendem a não implicar em “custo” elevado para a análise, visto que motivariam revisões ou repetições das comparações. Os erros do tipo 2, no entanto, tendem a ser mais comuns e ocorrem quando os avaliadores aceitam os resultados de uma aplicação do método por julgar que estes se aproximam da realidade, embora sejam inconsistentes (Baumbach, 2008; Wedley, 1993). Nesse caso, o “custo” para a análise seria considerável, porque o analista não realizaria novas comparações (Wedley, 1993).

Uma condição que pode não ser respeitada na presença de erros do tipo 2 para decisões coletivas é o ótimo de Pareto. Contudo, como os julgamentos no AHP não são ordinais, é possível agregar julgamentos individuais em um julgamento representativo de todo o grupo com ou sem observância do ótimo de Pareto (Saaty, 2008).

De qualquer maneira, o AHP se mantém como uma ferramenta útil para lidar com decisões complexas a partir de diversos critérios, inclusive benefícios, custos, oportunidades e riscos. O AHP já foi aplicado centenas de vezes para exemplos tanto reais quanto hipotéticos. A principal contribuição de um processo de decisão é a de gerar respostas que são válidas na prática e, por esse motivo, o AHP possui uma natureza descritiva e permite algumas hipóteses irrealistas, uma vez que as pessoas (tomadores de decisão) são intransitivas e inconsistentes (Saaty, 2008). Mais do que isso, o AHP possui grande flexibilidade e pode ser completado e integrado a diversas outras técnicas, oferecendo a oportunidade para que o analista consiga extrair os benefícios de todos os métodos combinados e alcançar seu objetivo de uma maneira superior e mais próxima de sua realidade (Vaidya & Kumar, 2006).

3. Seleção de Cenários de Precificação de Carbono (métodos de prevalência)

A qualidade do processo decisório tende a cair quanto mais alternativas o tomador de decisão precisa, simultaneamente, contemplar e avaliar, individualmente e com relação às demais alternativas. Conforme indicado no **Produto A.1**, estudos em diferentes campos do conhecimento sugerem que a precisão da decisão decresce caso o número de alternativas seja maior do que cinco (Gemünden & Hauschildt, 1985).

Similarmente, Baumbach (2008), com base na literatura, indica que também para o AHP, um número máximo de cinco alternativas parece indicado, tendo em vista o crescimento exponencial do número de comparações emparelhadas necessárias a partir da introdução de cada alternativa adicional.

Nesse sentido, caso a AIR do **Projeto PMR Brasil** identifique, inicialmente, número elevado de possíveis alternativas e critérios a serem incorporados ao problema de decisão, alguns métodos e procedimentos podem e devem ser adotados de forma a trazer o número final de alternativas para patamar que possa ser analisado com cuidado e precisão pelos *stakeholders* do Projeto durante os processos de coleta de suas opiniões.

Ainda que tal cenário seja, por ora, apenas uma possibilidade a ser explorada, a presente Seção tem como objetivo introduzir alguns dos métodos cujo emprego pode contribuir para o processo de eliminação de algumas alternativas em análises multicritério, os chamados métodos de prevalência ou sobreclassificação (*outranking*).

Esses métodos consistem na comparação par a par entre todas as alternativas segundo cada critério buscando encontrar qual alternativa prevalece sobre outra, ou seja, uma relação de sobreclassificação entre elas. Os métodos admitem a possibilidade de incomparabilidade de preferências e não necessitam assumir a transitividade das relações de preferências. Consideram, portanto, a possibilidade de hesitação ou incerteza do tomador de decisão.

A avaliação entre os critérios é representada pelos seus pesos e são construídas relações não compensatórias entre as alternativas. Não há *trade-offs* entre os critérios, ou seja, não há necessidade de compensação de uma desvantagem com relação a um atributo com uma vantagem

em outro. Caso desejável, uma alternativa pode, então, ser excluída dos demais passos da AMC caso seja dominada por outra de acordo com algum critério de interesse.

Entre os principais métodos de sobreclassificação estão os da família ELECTRE (*ELimination Et Choix Traduisant la REalité*) e da PROMETHEE (*Preference Ranking Organisation METHod for Enrichment of Evaluations*). Esses métodos podem ser estruturados em dois passos: i) construção da análise de sobreclassificação e; ii) análise dessa ordenação levando-se em conta as variáveis e as condições desenvolvidas no problema.

3.1 ELECTRE

O primeiro método desta família, o ELECTRE I, foi publicado em 1968 por Roy. Diversos outros modelos com base nesse foram desenvolvidos posteriormente para lidar com outros problemas de decisão que o ELECTRE I não era capaz.

Os métodos ELECTRE são relevantes quando se enfrentam problemas de decisão nos quais se desejam incluir ao menos três critérios no modelo. Além do número de critérios, deve-se verificar pelo menos uma das seguintes condições abaixo (Ishizaka & Nemery, 2013):

- 1) As opções são avaliadas (em pelo menos um critério) em uma escala ordinal ou em uma escala de intervalo 'fraca', onde as escalas não tornam possíveis fazer a comparação de diferenças.
 - a. Por exemplo, a temperatura de 60°F está 30°F acima de 30°F, mas não se pode dizer que é duas vezes mais quente que 30°F, porque as variáveis de intervalo não possuem um ponto zero verdadeiro.
- 2) Há uma forte heterogeneidade relacionada com a natureza da avaliação entre critérios.
 - a. Por exemplo, quando as performances do critério são expressas em diferentes unidades de medida (duração, peso, preço, cor etc.) é difícil agregar todos os atributos em uma escala única e comum.
- 3) O problema não permite um efeito compensatório. Não ocorre a compensação de uma perda em um dado critério por um ganho em outro.

- a. Por exemplo, um desempenho fraco causado pelo atraso de tempo não pode compensar uma boa qualidade de algum serviço.
- 4) Quando, para pelo menos um critério, pequenas diferenças de avaliação não são significativas em termos de preferências, mas a acumulação de muitas pequenas diferenças pode se tornar significativa. Isto requer a introdução de limiares de discriminação (indiferença e preferência), o que leva a uma estrutura de preferência com uma relação binária de indiferença intransitiva.

Modelando preferências usando relação de sobreclassificação

As preferências nos métodos ELECTRE são modeladas a partir de relações de *outranking* binárias, nas quais **S** significa “*pelo menos tão boa quanto*”. Considerando duas ações **a** e **b**, tem-se as seguintes situações (Figueira, Mousseau, & Roy, 2005):

- 1) aSb e não bSa : aPb (*a* é estritamente preferível a *b*);
- 2) bSa e não aSb : bPa (*b* é estritamente preferível a *a*);
- 3) aSb e bSa : aIb (*a* é indiferente a *b*); e
- 4) Não aSb e não bSa : aRb (*a* é incomparável a *b*).

Na última situação, o tomador de decisão não é capaz de comparar duas ações. Nota-se que, uma nova relação de preferência é introduzida, a incomparabilidade, útil para tais situações.

A construção de uma relação de *outranking* é baseada em dois conceitos principais:

- 1) **Concordância**: para que uma sobreclassificação “*a* é estritamente preferível a *b*” seja válida, uma maioria suficiente de critérios deve refletir essa afirmação.
- 2) **Não discordância**: quando a condição de concordância vale, nenhum dos critérios em minoria pode se opor muito fortemente à afirmação de que “*a* é estritamente preferível a *b*” (Figueira, Mousseau, & Roy, 2005).

Para que a afirmação aSb seja válida, as duas condições acima devem ser respeitadas.

Vale notar, também, que uma relação de *outranking* não é necessariamente transitiva. Essa intransitividade das preferências pode vir de duas situações diferentes. A primeira é quando ocorre circularidade, *a* é preferível a *b*, que é preferível a *c*, que é preferível a *a* (paradoxo de Condorcet) e a outra é quando as ações são incomparáveis.

Os métodos ELECTRE são aplicados em duas fases. A primeira consiste na comparação dos pares de alternativas - construção das relações de prevalência - e a segunda na aplicação do algoritmo para fazer a sobreclassificação. As versões do método se diferem operacionalmente e com relação aos tipos de situação para as quais são mais apropriadas (de Araujo & Amaral, 2016).

Desde que Roy publicou o ELECTRE I, em 1968, uma série de melhoras, pesquisas e desenvolvimentos ocorreram para que a técnica pudesse enfrentar novos tipos de problemas de decisão, dando origem às vertentes do método: ELECTRE I, Iv, Is, II, III, IV, TRI (B e C).

As vertentes ELECTRE I, ELECTRE Iv e ELECTRE Is enfrentam problemas de escolha. O tomador de decisão selecionará, entre um dado conjunto de opções, o menor subconjunto contendo as melhores opções. O ELECTRE Iv introduz o conceito de veto: se uma opção desempenha mal em um critério comparado a outra opção, ela será considerada como superada, independentemente de sua performance em outro critério. O ELECTRE Is de Roy e Skalka (1987) introduz o uso de pseudocritérios. Pseudocritérios são introduzidos para modelar o fato de que o tomador de decisão pode não ter uma preferência entre duas opções de um critério se a diferença entre suas performances é menor do que o limite da indiferença.

O ELECTRE II de Roy e Bertier (de 1971) e os ELECTRE III e IV desenvolvidos por Roy e Hugonnard dez anos depois lidam com problemas de ranqueamento, o que pode levar a um ordenamento parcial de um conjunto de opções (aceitando que duas opções são incomparáveis), mas sem atribuir uma pontuação para as alternativas (Ishizaka & Nemery, 2013). A ordem de preferência entre as opções é o resultado dos métodos. Para tanto, o ELECTRE II usa o conceito verdadeiro de critério, enquanto as versões III e IV usam pseudocritérios. O ELECTRE III usa graus de sobreclassificação (em vez de uma relação de sobreclassificação binária), enquanto o IV não requer o uso de importâncias relativas dos critérios (como pesos, por exemplo) (Ishizaka & Nemery, 2013; Aires, Braga, Silveira Neto, Valentim Neto, & Araújo, 2013; Silva & Costa, 2018).

O ELECTRE Tri-B e o ELECTRE Tri-C apresentados nos trabalhos de Yu (1992) e Mousseau, Slowinski e Zielniewicz (2000) são métodos de classificação que permitem a atribuição independente

de um conjunto de opções para uma ou muitas categorias pré-definidas. Esses métodos são, portanto, métodos de classificação supervisionada, mas com a particularidade de uma relação de preferências entre categorias, ou seja, elas podem ser ordenadas da melhor para a pior. Eles usam o conceito de pseudocritérios para estabelecer as relações de subordinação.

A principal característica e vantagem dos métodos ELECTRE é que eles evitam a compensação entre critérios e qualquer processo de normalização que distorcem os dados originais. Além disso, consideram incertezas e situações de difícil indicação de preferência. A desvantagem é que eles requerem muitos e complicados parâmetros técnicos, o que significa que nem sempre é fácil de entendê-los completamente. Portanto, requerem um desenvolvimento de processo automático de descoberta dos parâmetros. Além disso, a comparação par a par implica que as vantagens e desvantagens das alternativas não são identificadas diretamente (Ishizaka & Nemery, 2013; Campolina, Soárez, Amaral, & Abe, 2017).

Os métodos ELECTRE têm sido aplicados com sucesso nas decisões de diferentes áreas, tais como: gestão ambiental e florestal (Kangas, Kangas & Pykäläinen, 2001; Papadopoulos & Karagiannidis, 2006), recursos energéticos (Papadopoulos & Karagiannidis, 2006; Barda, Dupuis, & Lencioni, 1990), gestão de sistemas de hídricos (Arondel & Girardin, 2000) e estudos de contaminação e gestão de resíduos (Karagiannidis & Moussiopoulos, 1997; Hokkanen & Salminen, 1997).

3.2 PROMETHEE

O nome PROMETHEE é o acrônimo de “*Preference Ranking Organisation METHOD for Enrichment of Evaluations*” (Método de Organização de Classificação de Preferências para Avaliações Enriquecidas). Ou seja, a metodologia fornece ao tomador de decisão uma classificação das ações baseada em graus de preferência (Ishizaka & Nemery, 2013).

Assim como a família ELECTRE, a PROMETHEE é classificada como um método não compensatório, ou seja, não há *trade-offs* entre critérios. O método consiste em uma função de preferência associada a cada critério e os pesos descrevem suas importâncias relativas. O PROMETHEE é tido como um método eficiente quando o ranqueamento de um número finito de ações tem critérios antagônicos. O ordenamento das preferências é feito a partir da comparação

par a par. A escolha entre duas alternativas a e b é feita com a ajuda de uma função de preferência e seus pesos.

O PROMETHEE é considerado mais simples do que o ELECTRE, já que não envolve conceitos de concordância e discordância que requerem um maior nível de compreensão dos agentes envolvidos. O método consiste em construir uma relação de sobreclassificação de valores e envolve conceitos e parâmetros que tem uma interpretação clara, facilmente compreendida por tomadores de decisão e analistas, simplificando o processo de modelagem de preferências e aumentando a efetividade de sua aplicação. Além disso, sua implementação computacional é mais simples.

Desde a primeira publicação feita por Brans (1982), o método foi se desenvolvendo de modo a abordar diferentes tipos de questões, oito das quais serão apontadas na presente Seção. As versões PROMETHEE I (ordenamento parcial) e II (ordenamento completo) foram desenvolvidos em 1982. O PROMETHEE III (ordenamento baseado em intervalos) e o PROMETHEE IV (caso contínuo) foram desenvolvidos por Brans e Mareschal alguns anos depois. A versão V (incluindo restrições de segmentação) e a VI (representação do cérebro humano) surgiram em 1992 e 1994, respectivamente (Brans & Mareschal, 2005).

O método oferece ao tomador de decisões um ranking de ações (escolhas ou alternativas) baseado em graus de preferência (pontuações, entre 0 e 1, que expressam como uma ação é preferida em detrimento de outra, do ponto de vista do tomador de decisão). Consideram-se três passos técnicos para sua aplicação (Brans & Vincke, 1985; Morais & Almeida, 2007; Ishizaka & Nemery, 2013; Silva, Schramm, & Carvalho, 2014).

Passos técnicos para aplicação do método PROMETHEE¹¹

Passo 1: Cálculo dos graus de preferência para todos os pares ordenados de ações para cada critério.

PASSO 1.1 - Consiste na construção de uma matriz de avaliação. Deve-se compilar os dados em uma tabela de dupla entrada, uma para o critério selecionado e outra para as alternativas. Em seguida, deve-se atribuir uma função de preferência para cada um dos critérios.

¹¹ Tópico construído com base em Brans & Vincke (1985); Morais & Almeida (2007); Ishizaka & Nemery (2013); e Silva, Schramm, & Carvalho (2014), exceto quando explicitamente notado.

PASSO 1.2 - Identificação da função de preferência $P_j(a, b)$ para cada critério j . A função de preferência é usada para determinar quanto a alternativa a é preferida a alternativa b e traduz a diferença na avaliação de duas alternativas em um grau de preferência. Este varia de 0 a 1, em que 1 representa uma preferência forte de uma alternativa sobre a outra e 0 representa indiferença entre elas.

PASSO 1.3 - Para cada par de ações, define-se o índice de preferência de a sobre b para todos os critérios, calculado pela soma de $P_j(a, b)$ ponderada pelos pesos dos critérios.

Passo 2: Cálculo dos fluxos unicritério

Para cada alternativa, calculam-se os fluxos positivos $Q^+(a)$ que expressam quanto essa alternativa se sobressai em relação às outras e os fluxos negativos $Q^-(a)$ que representam quando as outras se sobressaem em relação a a .

$$Q^+(a) = \sum_{a \neq b} \frac{P(a, b)}{m - 1}$$

$$Q^-(a) = \sum_{a \neq b} \frac{P(b, a)}{m - 1}$$

Para levar em consideração os aspectos positivos e negativos, são calculados os fluxos líquidos subtraindo os negativos dos positivos. Os fluxos líquidos devem ser maximizados para que representem um equilíbrio entre as forças globais e as fraquezas globais de uma alternativa. A pontuação varia de -1 a 1.

Passo 3: Computação de fluxos globais

Para levar em consideração todos os critérios, calculam-se os fluxos globais. O tomador especifica os pesos para cada critério, que o permite agregar (soma ponderada) todos os fluxos positivos, negativos e líquidos para todos os unicritérios em fluxos positivos globais, negativos globais e líquidos globais que levam em consideração todos os critérios.

As notas positivas globais indicam o quanto uma ação é globalmente preferível a todas as outras quando considerados vários critérios e variam de 0 a 1, uma vez que os pesos são normalizados. Analogamente, os escores negativos indicam quanto uma ação é preferida às (superada pelas) demais. E os fluxos líquidos levam em consideração ambos, ser preferível ou preferido (superado).

Usos do PROMETHEE

Os principais métodos da família PROMETHEE distinguem-se entre si pelos seus usos, são eles (Morais & Almeida, 2007):

- ▣ PROMETHEE I: usado para problemas de escolha. Ele estabelece uma pré-ordem parcial entre as alternativas;
- ▣ PROMETHEE II: usado para problemas de ranqueamento. Ele estabelece uma pré-ordem completa entre as alternativas;
- ▣ PROMETHEE III: estabelece um pré-ordem completa com noção de indiferença amplificada (baseada em intervalos);
- ▣ PROMETHEE IV: usado para problemas de escolhas e ordenamento quando o conjunto de soluções viáveis é contínua. Estabelece pré-ordem completa ou parcial;
- ▣ PROMETHEE V: consiste em estabelecer a ordem conforme o PROMETHEE II e, em seguida, incluir restrições de segmentação. É geralmente o caso em que várias alternativas devem ser selecionadas;
- ▣ PROMETHEE VI: usado para problemas de escolha e ranqueamento e estabelece uma pré-ordem completa ou parcial. Quando o tomador de decisão não consegue ou não quer alocar pesos precisos para o critério, é possível especificar intervalos de valores possíveis em vez de atribuir valores fixos para cada peso;
- ▣ PROMETHEE GDSS Procedure: fornece ajuda de decisão para um grupo de tomadores de decisão com base no PROMETHEE II; e

- ▣ PROMETHEE-GAIA: consiste numa extensão dos resultados do PROMETHEE por meio de um procedimento interativo e visual.

Usos da técnica são reconhecidos em estudos de impacto climático (Neofytou, Karakosta, & Caldés Gómez, 2019), alternativas energéticas (Goumas & Lygerou, 2000), gestão hídrica; (Abu-Taleb & Mareschal, 1995; Hajkowicz & Higgins, 2008), gerenciamento de resíduos nucleares (Briggs, Kunsch, & Mareschal, 1990) entre outros.

4. Teoria da Utilidade Multiatributo - MAUT

As teorias de utilidade multiatributo (MAUT) e de valor multiatributo (MAVT) têm se tornado cada vez mais populares no auxílio de análises de decisão em problemas do mundo real, utilizadas individualmente ou em conjunto com outras metodologias. Entre os métodos de decisão, frequentemente se argumenta que a MAUT/MAVT possui a estrutura teórica mais sólida de todas as técnicas multicritério (Ballesteros & Romero, 1998; Gómez-Limón & Martínez, 2006). Assim, o uso desse tipo de método ajuda a dar legitimidade para processos decisórios de políticas que demandam transparência e que envolvem diversos agentes e resultam em alto impacto socioeconômico e ambiental.

O método se apoia nas hipóteses principais de que cada tomador de decisão tenta otimizar conscientemente ou implicitamente uma função que agrega todos os seus pontos de vista (Ishizaka & Nemery, 2013). Desenvolvido por Keeney & Raiffa (1976), o método procura estudar o comportamento de escolha do indivíduo de forma a identificar e quantificar a preferência do tomador de decisão sobre um conjunto de alternativas e representá-la por meio de uma função. Ele se baseia na teoria de utilidade esperada (von Neumann & Morgenstern, 1947), calculada com base nas consequências esperadas em diferentes cenários (alternativas) e as probabilidades de ocorrência de cada um deles (Ananda & Herath, 2005).

A MAUT busca superar as limitações das funções de atributo único, logo, se baseia na hipótese de que todo tomador de decisão busca otimizar uma função que agrega todos os atributos relevantes. Para cada alternativa a ser avaliada, existe um conjunto de atributos que a caracteriza e, para cada atributo, existe uma função utilidade específica que associa uma medida de valor a este atributo. A agregação das funções de utilidade ponderada por cada grau de importância é a função de utilidade multiatributo. As decisões se baseiam, então, na maximização dessa função de utilidade multiatributo. No caso da MAVT, a função utilidade é referida como função valor (Dyer, 2005).

A literatura mostra que as simplificações de modelagem que visam maximizar apenas um objetivo único são refutadas na vida real (Gómez-Limón & Martínez, 2006). A MAUT é, portanto, uma alternativa aos modelos baseados em um dos princípios básicos da teoria econômica (neo)clássica, qual seja, o de que os agentes tomam decisões maximizando um único objetivo, em geral, o lucro.

Com efeito, muitos tomadores de decisão consideram mais do que um atributo na função de utilidade, envolvendo inclusive critérios conflituosos relacionados à situação econômica, social, cultural, ambiental em adição aos do lucro esperado (Gómez-Limón & Martínez, 2006; André & Riesgo, 2007).

A ideia de uma função de utilidade contemplando múltiplos atributos tem como motivação também atributos não monetários e, por isso, a abordagem tem muitas aplicações envolvendo aspectos ambientais, conforme observado na **Tabela 3**, que apresenta algumas das mais relevantes aplicações do método.

Tabela 3
Artigos Relevantes com Aplicação do Método MAUT

Autor	Método	Área de aplicação
Ahmed & Husseiny, 1978	MAUT	Fontes energéticas
D'Agostino, Danny, & Paco, 2019	MAUT, AHP	Fontes energéticas
Yilan, Nes e Kadirgan, 2020	MAUT	Fontes energéticas
Zeevaert et.al., 2001	MAUT	Recuperação de áreas contaminadas
Gómez-Limón, Riesgo & Arriaza, 2004	MAUT	Uso de insumos na agricultura
Gómez-Limón & Martínez, 2006	MAUT	Seleção de sistemas de irrigação
Ananda & Herath, 2005.	MAUT, ELCE	Uso da terra
Wurtenberger, Thomas & Binder, 2005	MFA, MAUT	Uso da terra
Breljeh et. al. , 2018	MAUT, DEX	Saneamento e abastecimento de água
Scholten et.al., 2015	MAUT	Saneamento e abastecimento de água
Domínguez, et.al., 2019	MAUT	Saneamento e abastecimento de água
Monte & Almeida-Filho, 2016	MAUT	Saneamento e abastecimento de água
Bazzani, 2005	MAUT	Saneamento e abastecimento de água
Amorocho-Daza et. al., 2019	MAUT, AHP	Saneamento e abastecimento de água
Murrant & Radcliffe, 2018	MAVT	Fontes energéticas
Gómez-Limón & Riesgo, 2004	MAUT	Recursos hídricos
Kangas, 1993	AHP , MAUT	Gestão de áreas florestais
Vacik & Lexer, 2001	MAUT, AHP, SDSS	Gestão de áreas florestais
McCarthy, Ogden & Sperling, 2007	MAUT, outros	Geração de energia
Vauhkonen & Ruotsalainen, 2017	MAUT, outros	Gestão de áreas florestais
McKenna et. al., 2018	MAVT	Gestão de distribuição de energia
André & Riesgo, 2006	MAUT	Agricultura
Konidari & Mavrikis , 2007	AHP, SMART, MAUT	Mudança climática
Kamenopoulos & Tsoutsos, 2019	DSS inspirado na MAUT e SMART	Energia renovável
Lienert et.al., 2015	MAUT	Recursos hídricos
Zabeo et. al., 2011	MAVT	Áreas de contaminação

Fonte: elaborado pelos autores, com base em pesquisa no Google Scholar (conduzida em 03/01/2020).

Obs. 1: ELCE: Equally Likely Certainty Equivalent; MFA: Material Flow Analysis; DEX: Decision Expert; SDSS: Spatial Decision Support System; DSS: Decision Support Systems.

Obs. 2: termos pesquisados: "multi-attribute utility theory MAUT". Resultados apresentados conforme "relevância"; artigos exclusivamente teóricos não listados na tabela.

A popularidade do uso do método deve-se às suas diversas vantagens, entre as quais se destacam a capacidade de lidar com ambientes de decisão tanto determinísticos quanto estocásticos

(Wambui, 2017); de levar em consideração fatores como incerteza e risco (Velasquez & Hester, 2013); a possibilidade de avaliar um grande número de fatores quantitativos e qualitativos; e trabalhar com um grande número de alternativas simultaneamente e, assim, realizar análises de sensibilidade (Min, 1994).

Outro ponto relevante é a independência em relação à inserção de alternativas relevantes. Isto é, a inclusão de novas alternativas no processo decisório não altera a forma como as demais alternativas foram previamente avaliadas (Daher, 2009)¹². Assim, a MAUT permite ao tomador de decisão estruturar um problema complexo na forma de uma hierarquia simples, consistindo em um procedimento de avaliação objetiva, compreensível e incontestável quando se baseia em dados existentes (Konidari & Mavrakis, 2007), e que não requer julgamento holístico (Chan, Chan, & Kazeroon, 2002).

A principal desvantagem reside na necessidade de descoberta (elucidação) da própria função de utilidade multiatributo (Gómez-Limón & Martínez, 2006). Outro problema pode ser a necessidade de uma grande quantidade de informação para representar de forma precisa as preferências dos tomadores de decisão (Velasquez & Hester, 2013) e, para tanto, pode ser necessário elevado grau de interação entre os entes envolvidos para a definição dos pesos dos critérios e pontuação das alternativas (Ayala & Frank, 2013).

A função de utilidade e a função valor multiatributo (MAUT e MAVT)

A teoria de preferência aqui apresentada, na qual se ampara a MAUT/MAVT, é embasada em rigorosos axiomas que caracterizam os comportamentos de escolhas dos indivíduos e que são essenciais para estabelecer as funções de representação de preferências, além de oferecerem a racionalidade para a análise quantitativa das preferências (Dyer, 2005).

Assim, as relações de preferências devem possuir algumas propriedades desejáveis para que o indivíduo seja capaz de ordenar as alternativas às quais é exposto, tais como a assimetria e a transitividade. A assimetria assume que o indivíduo pode indicar sua preferência sobre um par de alternativas sem contradição e a transitividade estabelece que dado um conjunto de alternativas a ,

¹² Essa é uma limitação do método AHP, dependendo da abordagem escolhida para derivar as prioridades, em específico no caso da abordagem via autovalor (vide **Seção 2**).

b e c , se ele é capaz de estabelecer que a é preferível a b , então deve ser capaz de colocar a alternativa c em algum lugar na ordem de escala, ou melhor que a , ou pior que b ou ambos. Posto de outra forma:

- ▣ Se $a > b$; e
- ▣ $b > c$; então
- ▣ $a > c$.

Na aplicação do modelo, ao se considerar mais de um critério, a função de utilidade precisa considerar condições de independência entre critérios. Keeney (1971) oferece um quadro teórico e exige um conjunto de suposições – **independências de preferências e utilidades** – que permite a decomposição da função de utilidade multiatributo em uma forma mais prática de elucidação.

Um par de critérios é **preferencialmente independente** de outros critérios se a ordem de preferências sobre as consequências envolvendo apenas mudanças dos níveis dos atributos não depende do nível dos outros atributos (Daher, 2009). Independência de preferências mútuas implica que as curvas de indiferença para cada par de atributos não são afetadas pelos níveis fixos dos demais atributos. Esta suposição se refere a preferências por consequências (impactos) e não a “loterias” (utilidade esperada) (Rayno, Parnell, Burk, & Woodruff, 1997; Ananda & Herath, 2005).

A **independência em utilidade** (independência de risco) detecta a independência de preferências do tomador de decisão entre critérios. Ela implica que a atitude de uma pessoa em relação ao risco para um dado atributo não depende do nível dos demais atributos. A independência em utilidade é mútua se todos os subconjuntos desses atributos são independentes em utilidade de seus subconjuntos complementares (Dyer, 2005).

Se os atributos são mutuamente independentes em preferência, então eles são também mutuamente independentes em utilidade se qualquer par de atributos é independente de seus atributos complementares (Dyer, 2005). A hipótese de independência da preferência é mais fraca do que a da independência da utilidade (Ananda & Herath, 2005).

Para os casos que não envolvem incerteza, condições menos restritivas possibilitam o uso de uma versão mais simplificada da MAUT, a teoria de valor multiatributo. Neste caso, a teoria de preferência baseia-se na noção de comparações ordinais ou de intensidade de preferências e, no lugar de função utilidade, Dyer (2005) usa o termo função valor.

A condição exigida da MAVT para esses casos é de **independência de diferença fraca**. Um critério é independente com diferença fraca de outros critérios se a ordem da diferença de preferência entre os pares de valores deste critério não depende de um nível em particular dos demais critérios (Daher, 2009).

Os atributos são mutuamente fracamente independentes em diferença se todos os subconjuntos adequados desses atributos são fracamente independentes em diferença de seus subconjuntos complementares. Pode ser mostrado também que, se o mesmo atributo é independente em preferência mútua, ele é também mutuamente fraco em independências de diferença se qualquer par de atributos é independente fracamente em diferença de seus atributos complementares (Dyer, 2005).

Quando os atributos no modelo de utilidade de von Neumann-Morgenstern (1947) e as preferências de decisões são consistentes com a condição de independência, então a função utilidade pode ser decomposta em aditiva, multiplicativa ou outra forma estrutural que pode ser avaliada simplificadamente. Para casos envolvendo risco, devem-se atender às condições de preferências estritas, enquanto para casos sem incerteza a exigência é apenas da independência de diferença fraca.

Dito isso, considera-se A o conjunto de alternativas a_i (cenários) a serem comparadas, com base na utilidade $U(a)$ que cada uma gera. Como essas utilidades são números reais, as alternativas podem então ser comparadas entre si. Denota-se F o conjunto de q critérios f_j ($j = 1, \dots, q$) e para cada critério é gerada uma utilidade monoatributo¹³ $U_j(f_j)$. Em uma segunda fase, essas U_j são agregadas por uma soma ponderada, resultando em uma utilidade global (Ishizaka & Nemery, 2013), um valor único que representa o desempenho geral de cada alternativa. A função utilidade pode ser escrita na forma multiplicativa¹⁴:

¹³ Adota-se aqui o termo “utilidade monoatributo”, conforme sugerido por André & Riesgo (2007) em contraposição à função multiatributo, que agrega todas as utilidades, embora alguns autores utilizem a expressão “utilidade marginal”.

¹⁴ A forma multiplicativa é geralmente representada nos textos pela equação 1. Ela é uma modificação da original Keeney e Raiffa (1976):

$$U(f_1(a_i), \dots, f_q(a_i)) = \sum_{j=1}^q w_j f_j(a_i) + \dots + K \sum_{\substack{j=1 \\ m>j \\ l>m}}^q w_j w_m w_l f_j(a_i) f_m(a_i) f_l(a_i) + \dots + K^{q-1} w_1 w_2 \dots w_n f_1(a_i) f_2(a_i) f_q(a_i).$$

Nesta última, multiplicando os dois lados por K e somando 1, chega-se à Equação 1. Esta equação original permite observar com maior facilidade que quando $K=0$, resta apenas o primeiro termo, isto é, a função aditiva.

$$1 + KU(f_1(a_i), \dots, f_q(a_i)) = \prod_{j=1}^q [1 + Kw_j U_j(f_j(a_i))] \text{ (Equação 1)}$$

Se e somente se os atributos são mutuamente independentes em utilidade. Em que:

- ▣ $0 \leq w_j \leq 1$;
- ▣ $K = f(w_j)$ é uma constante escalar que deve satisfazer a restrição de normalização $1 + K = \prod_{j=1}^q (1 + Kw_j)$; e
- ▣ $\sum_{j=1}^q w_j \neq 1$.

Classificada como um modelo compensatório, a MAUT considera que a existência de *trade-offs* entre critérios é um elemento-chave na construção da função utilidade e permite a associação de pesos aos critérios que representam constante de escala entre todos os critérios. Os pesos representam o quanto o tomador de decisão está disposto a perder em um critério para ganhar em outro (Ishizaka & Nemery, 2013).

Isso significa que uma alternativa pode ser muito bem avaliada em um critério e mal avaliada em outro, mas ainda ter uma avaliação global melhor do que uma outra alternativa com desempenho mediano em ambos atributos (Daher, 2009). Novamente, na AIR do **Projeto PMR Brasil**, tais pesos serão descobertos a partir do método AHP (**Seção 2**).

Na maioria dos estudos aplicados em teoria de utilidade multiatributo, a função de utilidade é decomposta na forma aditiva. Segundo Edwards (1977) e Farmer (1987) (*apud*, Gómez-Limón & Martínez, 2006), as funções aditivas rendem aproximações extremamente próximas das funções hipoteticamente verdadeiras, mesmo quando as condições de independência não são satisfeitas.

Entretanto, a independência mútua de utilidade não implica que a função de utilidade é aditiva. Uma função de utilidade deve satisfazer a condição de independências aditivas para ser aditiva. Fishburn (1965) deriva as condições necessárias e suficientes para que a função de utilidade seja aditiva. A **condição chave para aditividade** é a condição de marginalidade que afirma que as preferências para qualquer loteria p, q pertencente a P , devem depender apenas das probabilidades marginais dos valores do atributo, e não da sua distribuição de probabilidade conjunta. Outras condições de

independência têm sido identificadas que levam a mais decomposições não aditivas da função de utilidade multiatributo¹⁵ (Dyer, 2005).

A avaliação das formas multiplicativas ou aditivas advindas das condições de independência mútua de utilidade é simplificada pelo fato de que cada uma das funções de utilidade de atributo único pode ser avaliada independentemente (com mais precisão, enquanto todos os outros atributos são mantidos constantes a valores selecionados arbitrariamente).

Nota-se que quando $\sum_{j=1}^q w_j = 1$, então $K = 0$, e a **Equação 1** se resume a uma função aditiva:

$$U(f_1(a_i), \dots, f_q(a_i)) = \sum_{j=1}^q w_j U_j(f_j(a_i)) \quad (\text{Equação 2})$$

Ou seja, quando a somatória dos pesos dos critérios é igual a um, a função de utilidade assume a forma aditiva. Quando a soma dos pesos dos critérios difere de um, a função de utilidade assume a forma multiplicativa.

Para o caso da MAVT, as representações são similares, dado que a definição de independência de preferência fraca tem semelhanças com a de independência de utilidade. Assim, considerando a função de valor multiatributo $V(f_j)$ no lugar de $U(f_j)$, temos na forma multiplicativa:

$$1 + \lambda V(f_1(a_i), \dots, f_q(a_i)) = \prod_{j=1}^q [1 + \lambda \lambda_j V_j(f_j(a_i))] \quad (\text{Equação 3})$$

Se e somente se os atributos são mutuamente fracamente independentes em diferença. Em que: V é a função valor multiatributo sobre a_i , escalar de 0 a 1, λ_j são constantes positivas, e λ é uma constante escalar adicional. Se λ é 0, a função toma a forma aditiva¹⁶:

$$V(f_1(a_i), \dots, f_q(a_i)) = \sum_{j=1}^q \lambda_j V_j(f_j(a_i)) \quad (\text{Equação 1})$$

Em que $\sum_{j=1}^q \lambda_j \neq 1$

¹⁵ Condições que podem ser vistas em Farquhar (1977).

¹⁶ Da mesma forma como explicado para o caso do MAUT, vide nota de rodapé 14.

Na ausência de incertezas, a condição para aditividade é chamada de **independência de diferença** que significa que a diferença de preferências entre duas alternativas multiatributos difere-se entre elas apenas em um atributo não dependendo dos valores comuns dos outros atributos. Os atributos são independentes mutuamente se todos os subconjuntos adequados desses atributos são independentes em diferença de seus subconjuntos complementares (Dyer, 2005).

Reforça-se, contudo e conforme exposto no **Produto A.1**, que a análise proposta para o Projeto PMR Brasil não deve contar com incerteza ou lidar com probabilidades para o desempenho das alternativas dentro dos critérios.

Normalização

A aplicação do método MAUT envolve a mensuração relativa dos atributos (critérios) por meio da atribuição de nota em um intervalo normalizado, por exemplo, entre 0 e 1 ou entre 0 e 100. Como os atributos são mensurados em unidades diferentes, a normalização é necessária para permitir a adição das utilidades marginais (Gómez-Limón & Martínez, 2006). Para um intervalo entre 0 e 1, as funções de utilidade marginal são tais que a melhor alternativa para um determinado critério tem pontuação igual a 1 e a pior alternativa tem pontuação igual a 0 (Ishizaka & Nemery, 2013).

No caso do **Projeto PMR Brasil**, os resultados brutos (*raw performances*) obtidos no **Componente 2A** para as alternativas em cada critério (contribuição para o Produto Interno Bruto - PIB, emprego etc.) $f_j(a_i)$ devem ser convertidos para essa escala. Quando o objetivo for maximizar um critério, o desempenho normalizado da alternativa i sob o critério j será calculado da seguinte forma (Ishizaka & Nemery, 2013):

$$f'_j(a_i) = \frac{f_j(a_i) - \min(f_j)}{\max(f_j) - \min(f_j)} \text{ (Equação 2)}$$

Já quando o objetivo for minimizar o critério, a nota será obtida com a seguinte fórmula:

$$f'_j(a_i) = 1 + \left[\frac{\min(f_j) - f_j(a_i)}{\max(f_j) - \min(f_j)} \right] \text{ (Equação 6)}$$

A avaliação das alternativas com utilização da MAUT, portanto, considera o intervalo (*range*) em que varia o desempenho delas sob um dado critério.

Linearidade

O formato das funções de utilidade reflete as preferências de um tomador de decisão. No caso de funções côncavas, por exemplo, pequenas variações em níveis mais baixos de desempenho em determinado critério implicam grande variação na utilidade. Funções lineares, por sua vez, representam uma posição neutra: a variação na utilidade é sempre proporcional à variação no desempenho (Ishizaka & Nemery, 2013).

A maioria das aplicações do método MAUT usa especificações lineares para a função U porque uma função linear é mais fácil de extrair e interpretar (André & Riesgo, 2007). A soma ponderada simples é um caso especial em que as funções U_j são todas lineares.

Considerando a premissa de que as funções de utilidade marginal são lineares, para cada critério j tem-se:

$$U_j(f_j(a_i)) = \alpha (f_j(a_i)) + \beta \text{ (Equação 3)}$$

Onde os coeficientes α e β são definidos para cada critério individualmente, de tal modo que $U_j(f_j(a_i)) = 1$ (ou 100) para o desempenho mais alto e $U_j(f_j(a_i)) = 0$ para o pior desempenho.

Simulações e experimentos sugerem que o método aditivo gera resultados muito próximos daqueles com funções não lineares (mais complicadas) como as funções quase-côncavas (Amador *et al*, 1998, *apud* Gómez-Limón & Martínez, 2006). Outra vantagem é que permite usar a MAUT sem a necessidade de entrevistas interativas com os tomadores de decisão (André & Riesgo, 2007).

Embora a hipótese de linearidade seja bastante forte e possa até não ser realista (pois implica utilidade marginal parcial constante), pode ser considerada uma boa aproximação desde que os atributos variem dentro de um intervalo relativamente estreito (André & Riesgo, 2007). Em outras palavras, o uso de funções lineares é plausível quando a inclinação das funções de utilidade monoatributo tiver pouco impacto no ranqueamento das alternativas.

5. Técnica de Ranqueamento Multiatributo Simples (SMART)

A Técnica de Ranqueamento Multiatributo Simples (*Simple Multi-Attribute Rating Technique* - SMART) implementada por Edwards (1977) é uma versão mais simples e alternativa da MAUT. Assim, ela carrega vantagens semelhantes às da MAUT com o benefício adicional da simplicidade de uso e transparência, que a torna popular sobretudo quando há fácil acesso aos juizes/tomadores de decisão e uma quantidade razoável de informações está disponível (Velasquez & Hester, 2013).

A sua natureza permite uma rápida implementação de modo que a SMART chega a ser utilizada em reuniões, nas quais grupos se encontram para considerar problemas de decisão. A simplicidade vem acompanhada do custo de não conseguir capturar todos os detalhes e complexidades de todos os problemas reais. Mas, na prática, a abordagem tem se mostrado extremamente robusta (Goodwin & Wright, 2004).

Aplicações envolvendo a técnica SMART são muito encontradas nas áreas ambiental, de construção, transporte, logística e militar (Velasquez & Hester, 2013). Uma das primeiras aplicações envolveu a avaliação de alternativas de disposição de resíduos nucleares no contexto de políticas energéticas, congregando aspectos técnicos e questões sociais avaliados por um grupo de especialistas (Otway & Edwards, 1977).

Marttunen & Hamalainen (1995) analisaram o método SMART (juntamente com MAUT e AHP) para avaliar o impacto ambiental de diferentes projetos desenvolvidos em um rio finlandês e o selecionaram (em detrimento dos outros métodos), uma vez que consumia menos tempo. Wakeman (2003) usou SMART para decidir sobre ações alternativas para lidar com contaminação de um rio no estado de Montana, Estados Unidos da América (EUA).

Taylor & Love (2014) usaram SMART para decisões de implantação de energia renovável em missões militares (SMART REDD). Os autores consideraram como vantagem a possibilidade de o método adicionar ênfase aos atributos mais importantes enquanto diminui o valor dos menos importantes quando avalia a utilidade total da solução. Tomando esse conceito mais profundamente, o SMART para decisões de implementação de energia renovável (SMART REDD) permite que os agentes levem em consideração atributos relacionados às missões (objetivos) de sistemas energia ao mesmo tempo que administra as restrições dessas missões.

SMART, suas extensões e passos técnicos

Assim como a MAUT, a SMART se baseia na independência de utilidades e de preferências. O método possui duas extensões bastante populares, a SMARTS (*SMART using Swing Weights*) e SMARTER (*SMART Exploiting Ranks*), desenvolvidas por Edwards & Barron (1994), que se diferenciam da original principalmente pelo método de atribuição de pesos dos critérios.

Na SMART, cada alternativa possui um número de critérios, com valores atribuídos junto a estes, e cada critério tem um peso que descreve seu grau de importância comparado com outros critérios. A SMART considera a função de utilidade linear:

$$u(a_i) = \sum_{j=1}^m w_j u_i(a_j) \quad (\text{Equação 8})$$

Em que:

- ▣ w_j é o peso do critério j ; e
- ▣ $u_i(a_j)$ é o valor de utilidade da alternativa i no critério j .

Os passos técnicos da SMART e extensões consistem em identificar os atores e questões envolvidas, atribuir valores aos critérios, normalizar as notas, atribuir pesos aos critérios e, por fim, calcular a utilidade. Edwards (1977) considera os seguintes passos técnicos:

- 1) Identificar os tomadores de decisão:** identificar a pessoa ou agência cujas utilidades serão maximizadas. Se várias organizações tiverem poder de decisão, todas devem ser identificadas;
- 2) Identificar a questão ou questões para as quais as utilidades são relevantes:** dependendo do contexto ou objetivo, os mesmos objetos ou atos podem ter muitos valores diferentes. A eficiência do método dependerá das circunstâncias e objetivos daquela decisão;
- 3) Identificar as alternativas a serem avaliadas:** formalmente, elas são os resultados de possíveis ações a serem tomadas;
- 4) Descobrir um número apropriado de dimensões de valores (critérios) relevantes para avaliação das alternativas:** o número de critérios deve ser modesto, uma vez que uma

grande quantidade de atributos pode implicar em pesos muito fracos para algum objetivo em particular quando da aplicação do PASSO 7. Nesse caso, seria melhor excluí-lo;

- a. Como regra de bolso, Edwards (1977) afirma que 15 critérios já seria uma lista muito grande.

- 5) **Ordenar as dimensões da ordem de importância;**
- 6) **Avaliar as dimensões em importância**, preservando as proporções. Para fazer isso, deve-se começar atribuindo à dimensão menos importante o valor de 10 e julgar qual seria o valor para o próximo critério relativamente ao menos importante;
- 7) **Calcular a média ponderada dos pesos atribuídos para cada alternativa:** este passo permite a normalização da importância relativa entre os pesos (soma 1). O resultado deste passo é o w_j da **Equação 8**;
- 8) **Atribuir valores de cada alternativa** sendo avaliada em cada dimensão (atributo) na escala de 0 a 100 (ou 0 a 10). Por conveniência, o ponto menos atrativo de cada escala é o 0 e a mais atrativa, 100 (ou 10). O resultado deste passo é o $u_i(a_i)$ da **Equação 8**;
- 9) Calcular as utilidades para as alternativas usando a **Equação 8**.

A questão relativa ao cálculo dos pesos dos critérios (Passo 7) é de crucial importância na técnica. Edwards & von Winterfeldt (1986) encontraram uma fraqueza do método no que se refere à determinação da importância dos pesos, pois o SMART não leva em consideração o intervalo entre as opções menos e mais preferidas em cada atributo. Se as opções possuem desempenhos muito similares em um atributo particular, de modo que o intervalo entre a melhor e a pior opção é pequeno, então é improvável que o atributo seja importante na decisão, embora o tomador de decisão possa considerá-lo importante *per se* (Goodwin & Wright, 2004).

Para contornar essa questão, Edwards & Barron (1994) apresentaram um novo procedimento de ponderação de classificação, o *swing weights*, nomeando a técnica de SMARTS, e propuseram também outro procedimento mais simples denominado SMARTER. Para a AIR do **Projeto PMR Brasil**, no entanto, os pesos dos critérios serão obtidos a partir de outro método, o AHP (discutido na **Seção 2**).

Propriedades e axiomas

Ao usar o SMART assume-se algumas hipóteses sobre as preferências do tomador de decisão. O método é válido se este é racional, ou seja, se ele se comporta consistentemente em relação aos axiomas abaixo (Goodwin & Wright, 2004):

- 1) Decidibilidade:** assume-se que o tomador de decisão está apto a decidir quais das opções ele prefere;
- 2) Transitividade:** se o tomador de decisão prefere a opção **a** com relação a **b** e também prefere **b** a **c**, a transitividade implica que ele prefere **a** a **c**;
- 3) Somatória (*summation*):** se o tomador de decisão prefere **a** a **b** e prefere **b** a **c**, então, a preferência de **a** sobre **c** tem que ser maior do que a de **a** sobre **b**;
- 4) Resolubilidade (solvabilidade):** se o tomador de decisão faz uma escolha, entre a pior e a melhor opção, que tem um valor (desempenho) entre os valores das melhores e piores opções, assume-se que essa opção intermediária existe. Esse axioma exclui a existência de lacunas, como a impossibilidade de escolha de uma opção intermediária (restrição de escolha de um local de instalação em algum ponto específico, por exemplo);
- 5) Limites inferiores e superiores para valores:** ao avaliar os valores (desempenhos) assume-se que a melhor opção não é tão maravilhosa e que a pior não é tão terrível a ponto de os valores do infinito positivo e negativo poderem ser atribuídos a essas opções.

Assim como para outros métodos, o SMART sugere que o problema de decisão seja disposto em formato de árvore de decisão. A partir da construção de tal árvore, é possível julgar se a representação das preocupações dos tomadores de decisão é acurada e útil. Para tal, cinco critérios são sugeridos por Goodwin & Wright (2004):

- 1) Completude:** se a árvore é completa, todos os atributos que são de preocupação do tomador de decisão estão inclusos;

- 2) **Operacionalidade:** este critério é satisfeito quando todos os atributos de menor nível na árvore são suficientemente especificados para que o tomador de decisão possa avaliá-los e compará-los tendo em vista as diferentes opções;
- 3) **Decomposição:** este critério requer que a performance de uma opção em um atributo seja julgada independentemente de sua performance em outros atributos;
- 4) **Ausência de redundância:** se dois atributos duplicam um ao outro é porque eles representam a mesma coisa, então são redundantes. O perigo da redundância é a dupla contagem, resultando em peso maior para tal atributo e, conseqüentemente, afetando o resultado; e
- 5) **Tamanho mínimo:** se a árvore é muito grande o entendimento da análise pode se tornar impossível. Deve-se garantir que os atributos não se decomponham além do nível onde eles podem ser avaliados.

Apesar do crescimento do uso do SMARTS e do SMARTER, conforme exposto acima, o SMART segue uma técnica bastante popular. Com efeito, a técnica, em sua versão original e mais simples, apresenta menor grau de inconsistência interna frente a outros métodos para a descoberta e ponderação de pesos (como os *swing weights*) (Borcherding, Eppel, & Von Winterfeldt, 1991).

Novamente, para o **Projeto PMR Brasil**, a técnica SMART será empregada para a avaliação das alternativas com relação aos atributos (critérios) não contemplados pelo **Componente 2A**, a menos que sejam identificadas outras fontes de dados quantitativos para os critérios de avaliação identificados¹⁷.

Aqui, será necessária uma avaliação direta (por exemplo, nota de 0 a 10) pelos *stakeholders* ou tomadores de decisão, que serão convertidas em notas normalizadas, expressando a importância relativa atribuída pelos tomadores de decisão ou pelos *stakeholders* envolvidos com o problema de decisão (Konidari & Mavrakis, 2007). A **Tabela 4** lista os valores convertidos para a escala MAUT de 0 a 100 após a avaliação direta.

¹⁷ Tal identificação não será realizada pela equipe da FGV, mas pode ser feita pelo Comitê Executivo do Projeto.

Tabela 4
Avaliação de uma Alternativa sob um (sub)critério

Desempenho	Nota atribuída pelos tomadores de decisão / stakeholders	Nota equivalente na escala MAUT [0; 100]
Nulo	0	1
Um pouco mais que nulo, menos que 'muito ruim'	1	1,58
Muito ruim	2	2,51
Ruim	3	4,01
Superior a 'ruim', menos que 'moderado'	4	6,25
Moderado	5	9,98
Superior a 'moderado'; menos que 'bom'	6	15,81
Bom	7	25,05
Superior a 'bom'; menos que 'muito bom'	8	39,69
Muito bom	9	62,88
Excelente	10	99,62 \approx 100

Fonte: Konidari & Mavrakis (2007).

Diferentemente da MAUT, como a avaliação é qualitativa e não baseada em dados numéricos, pode-se argumentar que a SMART é menos objetiva. Entretanto, a subjetividade pode ser minimizada pela participação de um grupo relativamente diverso na avaliação. Nesse caso, será importante assegurar a participação de representantes dos diferentes segmentos: governo, setor privado, academia e sociedade civil. Os passos para a síntese dos resultados são semelhantes aos da MAUT: as notas normalizadas são ponderadas pelos pesos designados aos critérios, prosseguindo-se com a soma delas.

6. Considerações Finais e Próximos Passos

O presente produto teve caráter exclusivamente metodológico e teórico e foi dedicado à apresentação pormenorizada das vantagens, desvantagens, oportunidades e limitações inerentes a cada um dos métodos a serem empregados na análise multicritério que comporá a AIR do **Projeto PMR Brasil**, sendo eles: i) o Analytical Hierarchy Process; ii) a Teoria da Utilidade Multiatributo; e iii) a Técnica de Ranqueamento Multiatributo Simples. Complementarmente, fez-se breve discussão acerca de métodos possíveis para auxiliar, caso necessário, no processo de redução e delimitação do número de alternativas a serem incluídas na análise.

Definidos e apresentados esses métodos, os próximos passos da AIR dizem respeito às etapas de coleta de dados para aplicação desses métodos, já iniciadas com a primeira rodada de questionários¹⁸, e que ao final do processo permitirão: i) construir a hierarquia do problema de decisão, com a identificação dos critérios relevantes; ii) ponderar os critérios; iii) avaliar as alternativas de regulação dentro desses critérios; e iv) calcular a utilidade global de cada alternativa.

Tal primeira rodada de questionários deve auxiliar na construção dessa hierarquia, uma das etapas mais importantes de uma AMC e da aplicação do AHP, ao menos com a identificação dos critérios relevantes para a comparação de opções de instrumentos de precificação de carbono (e, eventualmente, comando e controle) de acordo com as preferências e percepções dos próprios *stakeholders* do Projeto. Com efeito, uma hierarquia que é construída “sob medida” e conjuntamente com os *stakeholders* deve servir melhor aos seus propósitos (Arbel & Orgler, 1990).

Adicionalmente, os questionários devem oferecer a base para a atribuição de pesos para cada critério, processo esse que pode ser refinado e complementado com outras rodadas de perguntas e/ou durante o dia restante para a realização de Oficina Técnica de trabalho no âmbito do **Projeto PMR Brasil**. Os pesos atribuídos aos critérios levantados serão, portanto, resultado da aplicação do método AHP.

Em seguida, dar-se-á início às aplicações dos métodos MAUT e SMART. O primeiro será resultado da normalização dos resultados das modelagens econômicas realizadas pelo **Componente 2A**. O

¹⁸ Disponibilizada, por meio *online*, entre os dias 3 de dezembro de 2019 e 22 de janeiro de 2020.

segundo deve ter por base mais um processo de consulta a *stakeholders* do Projeto, eventualmente em grupo mais restrito e composto por especialistas, para a atribuição direta das notas aos critérios restantes.

Naturalmente, e conforme mencionado previamente, as decisões sobre como tratar e agregar as informações das diferentes etapas de consulta são também consequência dos próprios resultados obtidos ao longo do processo, em especial a partir das rodadas de questionários e das dinâmicas realizadas na oficina de trabalho. Tais etapas estão em andamento ou ainda serão conduzidas e, por conseguinte, serão alvo de discussão, de maneira aplicada, nos **Produtos A.3 e A.4**, dedicados ao registro dos processos de consulta e aos resultados da AIR.

7. Referências Bibliográficas

Abu-Taleb, M., & Mareschal, B. (1995). Water resources planning in the Middle East: application of the PROMETHEE V multicriteria method . *European Journal of Operational Research*, 500-511.

Ahmed, S., & Husseiny, A. (1978). A multivariate utility approach for selection of energy sources. *Energy*, 3, pp. 669-700.

Aires, R., Braga, L., Silveira Neto, J. C., Valentim Neto, A. J., & Araújo, A. G. (2013). Apoio à Decisão de Compra na Indústria de Cimentos e Derivados: Um Estudo Utilizando o Método ELECTRE. *IV Encontro de Administração da Informação*.

Ananda, J., & Herath, G. (2005). Evaluating public risk preferences in forest land-use choices using multi-attribute utility theory. *Ecological Economics*, 55, pp. 408-419.

André, F., & Riesgo, L. (2007). A non-interactive elicitation method for non-linear multiattribute utility functions: Theory and application to agricultural economics. *European Journal of Operational Research*, 181, pp. 793-807.

Antonov, L. (11 de Março de 2008). *Eigenvalue equation*. Fonte: Wikimedia Commons: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Eigenvalue_equation.svg

Arbel, A., & Orgler, Y. E. (1990). An application of the AHP to bank strategic planning: The mergers and acquisitions process. *European Journal of Operational Research*, 48, pp. 27-37.

Arondel, C., & Girardin, P. (2000). Sorting cropping systems on the basis of their impact on groundwater quality *European Journal of Operational Research*. *European Journal of Operational Research* , 467-482.

Ayala, N. F., & Frank, A. G. (2013). Métodos de análise multicriterial: uma revisão das forças e fraquezas. *Semana de Engenharia de Produção Sul Americana*. Porto Alegre.

Ballestero, E., & Romero, C. (1998). *Multiple Criteria Decision Making and Its Applications to Economic Problems*. Kluwer Academic.

- Baumbach, J. (2008). Using the Analytical Hierarchy Process to Evaluate Target Signatures. *Land Warfare Conference 2008*, pp. 29-34.
- Benítez, J., Delgado-Galván, X., Gutiérrez, J., & Izquierdo, J. (2011). Balancing consistency and expert judgment in AHP. *Mathematical and Computer Modelling*, 54, pp. 1785-1790.
- 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*, 232, pp. 584-592.
- Borcherding, K., Eppel, T., & Von Winterfeldt, D. (1991). Comparison of weighting judgments in multiattribute utility measurement.
- Bouyssou, D., Perny, P., Pirlot, M., Tsoukias, A., & Vincke, P. (1993). A manifesto for the new MCDA era. *Journal of multi-criteria decision analysis*, 2(3), pp. 125-127.
- Brans, J. P., & Vincke, P. (1985). A Preference Ranking Organisation Method:(The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making). *Management Science*.
- Brans, J., & Mareschal, B. (2005). PROMETHEE Methods. Em J. Figueira, S. Greco, & M. Ehrgott, *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the art Surveys* (pp. 163-195). Boston: Springer.
- Briggs, T., Kunsch, P., & Mareschal, B. (1990). Nuclear waste management: An application of the multicriteria PROMETHEE methods. *European Journal of Operational Research*.
- Burden, R. L., & Faires, J. D. (1993). *Numerical Analysis* (5^a ed.). Boston, MA: Prindle, Weber and Schmidt.
- Campolina, A. G., Soárez, P. C., Amaral, F. V., & Abe, J. M. (2017). Análise de decisão multicritério para alocação de recursos e avaliação de tecnologias em saúde: tão longe e tão perto?. *Cadernos de Saúde Pública*, 33.

Chan, F. T., Chan, H. K., & Kazerooni, A. (2002). A fuzzy multi-criteria decision-making technique for evaluation of scheduling rules. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103-113.

Choo, E. U., & Wedley, W. C. (2004). A common framework for deriving preference values from pairwise comparison matrices. *Computers & Operations Research*, 31(6), pp. 893-908.

Costa, C. A., & Vansnick, J.-C. (2008). A critical analysis of the eigenvalue method used to derive priorities in AHP. *European Journal of Operational Research*, pp. 1422-1428.

Crawford, G., & Williams, C. (1985). A note on the analysis of subjective judgment matrices. *Journal of mathematical psychology*, 29(4), pp. 387-405.

Daher, S. d. (2009). Modelos de decisão em grupo para agregação de preferências baseados em função utilidade aditiva.

de Araujo, J., & Amaral, T. (2016). Aplicação do método ELECTRE I para problemas de seleção envolvendo projetos de desenvolvimento de software livre. *GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas*, p. 121-137.

Dodgson, J., Spackman, M., Pearman, A., & Phillips, L. (2009). *Multi-criteria analysis: a manual*. Economic History Working Papers, London School of Economics and Political Science, Department of Economic History.

Dong, Y., Xu, Y., Li, H., & Dai, M. (2008). A comparative study of the numerical scales and the prioritization methods in AHP. *European Journal of Operational Research*, 186, pp. 229-242.

Dyer, J. S. (2005). *MAUT - Multiattribute Utility Theory*.

Edwards, W. (1977). Use of Multiattribute Utility Measurement for Social Decision Making. *Conflicting*, p. 247.

Edwards, W., & Barron, F. H. (1994). SMARTS and SMARTER: Improved simple methods for multiattribute utility measurement. *Organizational behavior and human decision processes*, 60(3), pp. 306-325.

Edwards, W., & von Winterfeldt, D. (1986). Decision analysis and behavioral research. *Cambridge University Press*.

Farquhar, P. H. (1977). A survey of multiattribute utility theory and applications. Em M. Starr, & Z. M., *Multiple Criteria Decision Making* (pp. 59-90).

Figueira, J. R., Mousseau, V., & Roy, B. (2005). ELECTRE METHODS. Em J. FIGUEIRA, S. GRECO, & M. EHRGOTT, *MULTIPLE CRITERIA DECISION ANALYSIS: STATE OF THE ART SURVEYS* (pp. 133-162). BOSTON: SPRINGER.

Fishburn, P. C. (1965). Independence in utility with whole product sets. *Operations Research*,.

Forman, E., & Peniwati, K. (1998). Aggregating individual judgments and priorities with the analytic hierarchy process. *European journal of operational research*, 108(1), pp. 165-169.

Gemünden, H. G., & Hauschildt, J. (1985). Number of alternatives and efficiency in different types of top-management decisions. *European Journal of Operational Research*, 22, pp. 178-190.

Golani, B., & Kress, M. (1993). A multicriteria evaluation of methods for obtaining weights from ratio-scale matrices. *European Journal of Operational Research*, 69(2), pp. 210-220.

Gomes, L. F. (2006). *Teoria da decisão*. São Paulo: Pioneira Thomson Learning.

Gómez-Limón, J., & Martínez, Y. (2006). Multi-criteria modelling of irrigation water market at basin level: A Spanish case study. *European Journal of Operational Research*, 173, pp. 313-336.

Gómez-Limón, J., & Riesgo, L. (2004). Water pricing: Analysis of differential impacts on heterogeneous farmers. *Water Resources Research*, 40, pp. 1-12.

Goodwin, & Wright. (2004). *Decision Analysis for Management Judgment*. John Wiley & Sons.

- Goumas, M., & Lygerou, V. (2000). An extension of the PROMETHEE method for decision making in fuzzy environment: Ranking of alternative energy exploitation projects . *European Journal of Operational Research*, 606-613.
- Guitouni, A., & Martel, J.-M. (1998). Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method. *European Journal of Operational Research*, 109(2), pp. 501-521.
- Hajkowicz, S., & Higgins, A. (2008). Decision Support A comparison of multiple criteria analysis techniques for water resource management . *European Journal of Operational Research*, 255-265.
- Harker, P. T., & Vargas, L. G. (1987). The theory of ratio scale estimation: Saaty's analytic hierarchy process. *Management science*, 33(11), pp. 1383-1403.
- Ishizaka, A., & Labib, A. (2009). Analytic Hierarchy Process and Expert Choice: Benefits and Limitations. *Benefits and Limitations*, 22(4), pp. 201-220.
- Ishizaka, A., & Lusti, M. (2006). How to derive priorities in AHP: a comparative study. *Central European Journal of Operations Research*, 14(4), pp. 387-400.
- Ishizaka, A., & Nemery, P. (2013). Multi-attribute utility theory. Em A. Ishizaka, & P. Nemery, *Multi-criteria decision analysis: methods and software* (pp. 81-112). John Wiley & Sons.
- Keeney, R. L. (1971). Utility independence and preferences for multiattributed consequences. *Operations Research*, 875-893.
- Keeney, R. L., & Raiffa, H. (1976). *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value*.
- Konidari, P., & Mavraklis, D. (2007). A multi-criteria evaluation method for climate change mitigation policy instruments. *Energy Policy*, 35, pp. 6235-6257.
- Marttunen, M., & Hamalainen, R. (1995). Decision analysis interviews in environmental impact assessment.
- Min, H. (1994). International Supplier Selection: : A Multi-attribute Utility Approach.

Morais, D., & Almeida, A. (2007). Group decision-making for leakage management strategy of water network . *Resources, Conservation and Recycling*, 441-459.

Mousseau, V., Slowinski, R., & Zielniewicz, P. (2000). A user-oriented implementation of the ELECTRE-TRI method integrating preference elicitation support. *Computers & operations research*, 27(7-8), pp. 757-777.

Neofytou, H., Karakosta, C., & Caldés Gómez, N. (2019). Impact Assessment of Climate and Energy. Em H. Doukas, A. Flamos, & J. Lieu, *Understanding Risks and Uncertainties in Energy and Climate Policy*. Springer.

Otway, H. J., & Edwards, W. (1977). *Application of a Simple Multiattribute Rating Technique to evaluation of nuclear waste disposal sites: a demonstration*. Laxenburg, Austria: IIASA.

Palcic, I., & Lalic, B. (2009). Analytical Hierarchy Process as a tool for selecting and evaluating projects. *International Journal of Simulation Modelling (IJSIMM)*, 8(1).

PMR. (2019). *Termos de referência para aditivo ao componente 3 do Projeto PMR Brasil: Realização de análise de impacto regulatório*. Brasília: Projeto PMR Brasil.

Ramanathan, R. (2001). A note on the use of the analytic hierarchy process for environmental impact assessment. *Journal of Environmental Management*, 63, pp. 27-35.

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*, 79(2), pp. 249-265.

Rayno, B., Parnell, G., Burk, R., & Woodruff, B. W. (1997). A Methodology to Assess the Utility of Future Space Systems. *Journal of Multi-criteria decision analysis*, pp. 344-354.

Roy, B., & Skalka, J. M. (1987). *ELECTRE IS: Aspects méthodologiques et guide d'utilisation*. Paris: LAMSADE, Unité associée au CNRS no 825, Université de Paris Dauphine.

Saaty, T. L. (1977). A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15(3), pp. 234-281.

Saaty, T. L. (2005). *Theory and applications of the analytic network process: decision making with benefits, opportunities, costs, and risks*. RWS publications.

Saaty, T. L. (2008). Relative measurement and its generalization in decision making why pairwise comparisons are central in mathematics for the measurement of intangible factors the analytic hierarchy/network process. *RACSAM - Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Fisicas y Naturales. Serie A. Matematicas*, 102(2), pp. 251-318.

Silva, J. L., & Costa, H. (2018). Abordagem Multicritério para Avaliação/Certificação de edificações sustentáveis. *Revista de Trabalhos Acadêmicos*.

Silva, V., Schramm, F., & Carvalho, H. R. (2014). O uso do método PROMETHEE para seleção de candidatos à bolsa-formação do Pronatec. . *Production*, 548-558.

Srdjevic, B., & Srdjevic, Z. (2013). Synthesis of individual best local priority vectors in AHP-group decision making. *Applied Soft Computing*, 13, pp. 2045-2056.

Taylor, J. M., & Love, B. (2014). Simple multi-attribute rating technique for renewable energy deployment decisions (SMART REDD).

Vaidya, O. S., & Kumar, S. (2006). Analytic hierarchy process: An overview of applications. *European Journal of operational research*, 169(1), pp. 1-29.

Vargas, L. G. (1997). Comments on Barzilai and Lootsma: Why the multiplicative AHP is invalid: A practical counterexample. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 6(3), pp. 169-170.

Velasquez, M., & Hester, P. T. (2013). An Analysis of Multi-Criteria Decision Making Methods. *International Journal of Operations Research*, 10(2), pp. 56-66.

Vincke, P. (1989). *L'aide multicritère à la décision*. Bruxelles: Editions de l'ULB et Editions Ellipses.

Von Neumann, J., & Morgenstern, O. (1947). *Theory of Games and Economic Behavior*. Princeton.

Wakeman, J. (2003). Milltown reservoir sediment/Clark Fork River superfund site-focused feasibility study.

Wambui, L. K. (2017). Factors affecting the implementation of green procurement practices in nairobi city water and sewerage company limited.

Wang, Y.-M., & Luo, Y. (2009). On rank reversal in decision analysis. *Mathematical and Computer Modelling*, 49(5-6), pp. 1221-1229.

Wedley, W. C. (1993). Consistency Prediction for Incomplete AHP Matrices. *Mathematical and Computing Modeling*, 17(4-5), pp. 151-162.

Yu, W. (1992). *ELECTRE TRI (aspects méthodologiques et manuel d'utilisation)*. Paris: Université de Paris-Dauphine, LAMSADE.

Zeevaert, T., Bousher, A., Brendler, V., Hedeman Jensen, P., & Nordlinder, S. (2001). Evaluation and ranking of restoration strategies for radioactively contaminated sites. *Journal of Environmental Radioactivity*, 56, pp. 33-50.

Zhu, X., & Dale, A. P. (2001). JavaAHP: a web-based decision analysis tool for natural resource and environmental management. *Environmental Modelling & Software*, 16, pp. 251-262.