

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**MODELOS DE DECISÃO MULTICRITÉRIO E DE  
PORTFÓLIO COM APLICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO DE  
POLÍTICAS ENERGÉTICAS SUSTENTÁVEIS**

TESE SUBMETIDA À UFPE  
PARA OBTENÇÃO DE GRAU DE DOUTOR  
POR

MARINA DANTAS DE OLIVEIRA DUARTE  
Orientador: Prof. Adiel Teixeira de Almeida, PhD

RECIFE, OUTUBRO / 2011

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Raquel Cortizo, CRB-4 664

D812m Duarte, Marina Dantas de Oliveira.  
Modelos de decisão multicritério e de portfólio com aplicação na construção de políticas energéticas sustentáveis / Marina Dantas de Oliveira Duarte. - Recife: O Autor, 2011.  
x, 122 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. PhD. Adiel Teixeira de Almeida  
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco.  
CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Produção. 2011.  
Inclui Referências Bibliográficas.

1. Engenharia da Produção 2. Apoio multicritério à decisão  
3. Portfólio 4. Elicitação de sinergias. 5. Políticas energéticas. 6. Sustentabilidade I. Almeida, Adiel Teixeira (orientador) II. Título.

658.5 CDD (22. ed.)

UFPE  
BCTG/2011-221



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA  
DE DEFESA DE TESE DE  
DOUTORADO DE

**MARINA DANTAS DE OLIVEIRA DUARTE**

***"MODELOS DE DECISÃO MULTICRITÉRIO E DE PORTFÓLIO COM APLICAÇÃO NA  
CONSTRUÇÃO DE POLÍTICAS ENERGÉTICAS SUSTENTÁVEIS"***

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PESQUISA OPERACIONAL

A comissão examinadora, composta pelos professores abaixo, sob a presidência do(a) primeiro(a), considera a candidata MARINA DANTAS DE OLIVEIRA DUARTE **APROVADA.**

Recife, 07 de outubro de 2011.

\_\_\_\_\_  
Prof. ARIEL TEIXEIRA DE ALMEIDA, PhD (UFPE)

\_\_\_\_\_  
Profª. ANA PAULA CABRAL SEIXAS COSTA, Doutor (UFPE)

\_\_\_\_\_  
Profª. CAROLINE MARIA DE MIRANDA MOTA, Doutor (UFPE)

\_\_\_\_\_  
Prof. ANDRÉ MARQUES CAVALCANTI, Doutor (UFPE)

\_\_\_\_\_  
Profª. MARCIA MARIA GUEDES ALCOFORADO DE MORAES, Doutor (UFPE)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me proporcionar saúde e condições de executar o trabalho que me coube ao longo dessa jornada.

Gostaria também de agradecer a algumas pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para o desenvolvimento desta tese:

Ao orientador deste trabalho, o *Prof. Adiel Teixeira de Almeida*, pelo incentivo acadêmico, conhecimentos compartilhados, comentários essenciais e olhar crítico.

À comissão examinadora – *Prof.<sup>a</sup> Ana Paula Costa*, *Prof. André Cavalcanti*, *Prof.<sup>a</sup> Caroline Mota* e *Prof.<sup>a</sup> Márcia Alcoforado* – pelos valorosos questionamentos e observações que sem dúvida enriqueceram este trabalho.

À Universidade Federal de Pernambuco, especialmente ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, representado pelos professores e funcionários.

Ao CNPq, órgão financiador desta pesquisa.

Aos companheiros de doutorado e do laboratório de pesquisa CDSID, com os quais tive a oportunidade de trabalhar diariamente e compartilhar momentos de árduo estudo, representados aqui por *Maísa* e *Marcelo*.

A minha família, pelo apoio e compreensão da minha ausência em diversos momentos.

A *João Paulo* e *Maria José*, por me ajudarem a estabelecer um ambiente de estudos tranquilo e confortável.

Aos amigos que são vários e certamente contribuíram, mesmo que à distância, especialmente *Anete*, *Luciano*, *Marília* e *Rômulo*.

*Man's mind stretched by a new idea  
never goes back to its original dimensions.  
(Oliver Wendell Holmes)*

## RESUMO

A elaboração de políticas energéticas é uma questão que envolve aspectos de naturezas diferentes e está relacionada a um amplo contexto. A introdução da sustentabilidade como um objetivo a ser atingido para manter o suprimento energético e permitir o desenvolvimento econômico e social de um país aumenta a complexidade das decisões a serem tomadas. Eficiência Energética e Energia Renovável são dois aspectos essenciais para a construção de uma política energética sustentável. Este trabalho propõe a utilização de métodos multicritério para abordar dois problemas pertinentes ao contexto político em energia: a seleção de um portfólio de políticas energéticas sustentáveis e o subproblema de seleção das fontes de energia alternativas a serem incluídas em uma matriz energética. No que tange ao problema de portfólio, a consideração de sinergias é um aspecto relevante e a sua análise permitiu a proposição de um modelo para a eliciação de tais valores. A eliciação de sinergias é uma tarefa muito dependente do conjunto de alternativas consideradas e da percepção do especialista entrevistado. O modelo desenvolvido permite elicitar sinergias para pares de alternativas, sem exigir que estes valores sejam dissociados na contribuição de uma alternativa para outra. Comparado ao modelo de sinergia individual o modelo proposto exige menos informação ao especialista, o que torna o questionário de eliciação menos exaustivo.

***Palavras-chave:*** Apoio Multicritério à Decisão; Portfólio; Eliciação de Sinergias; Políticas Energéticas; Sustentabilidade.

## ABSTRACT

The development of energy policies is an issue that involves aspects of different nature and is related to a large context. The introduction of sustainability as a goal to be achieved to maintain the energy supply and to allow the economic and social development of a country increases the complexity of the decisions to be made. Energy Efficiency and Renewable Energy are two essential aspects for building a sustainable energy policy. This work proposes the use of multicriteria methods to address two relevant political energy problems: the sustainable energy policies portfolio selection and the subproblem of selecting alternative energy sources to be included in an energy matrix. Regarding the portfolio problem, synergies consideration is an important issue and its analysis allowed proposing a model for the elicitation of such values. The synergies elicitation is a task highly dependent on the set of alternatives considered and on the perception of the experts interviewed. The model developed enables to elicit synergies among pairs of alternatives, without requiring that these values are separated in the contribution of each alternative to another. Compared to the individual synergy model the proposed model requires less information from the expert, which makes the elicitation questionnaire less exhaustive.

*Keywords: Multicriteria Decision Aid, Portfolio; Synergy Elicitation; Energy Policies; Sustainability.*

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1	Relevância e contribuição do estudo .....	1
1.2	Objetivo Geral .....	3
1.3	Objetivos Específicos .....	3
1.4	Estruturação da Tese.....	3
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>5</b>
2.1	Fundamentação Teórica.....	5
2.1.1	Decisão Multicritério .....	5
2.1.1.1	Estrutura do Processo de Apoio Multicritério à Decisão .....	6
2.1.1.2	Atores do Processo Decisório.....	7
2.1.1.3	Problemáticas de Referência .....	8
2.1.1.4	Família de Critérios.....	9
2.1.1.5	Métodos de Apoio Multicritério a Decisão .....	10
2.1.2	A Problemática de Portfólio e sua relação com a Gestão de Projetos e Programas .....	19
2.1.3	Conceitos sobre Sinergia em Sistemas.....	21
2.2	Revisão Bibliográfica.....	23
2.2.1	Portfólio .....	23
2.2.2	Políticas em Energia Sustentável .....	29
2.2.2.1	Contexto Global .....	30
2.2.2.2	Contexto Nacional.....	33
2.2.3	Modelos de Decisão em Energia Sustentável .....	42
2.2.3.1	Seleção de Tecnologia.....	45
2.2.3.2	Outras Aplicações em Energia Sustentável .....	47
2.2.4	Síntese do Estado da Arte e Posicionamento deste Trabalho.....	55
<b>3</b>	<b>AVALIAÇÃO DE FONTES DE ENERGIA ALTERNATIVAS .....</b>	<b>58</b>
3.1	Seleção de Fontes Alternativas a serem Incorporadas na Matriz Energética Brasileira .....	58
3.2	Síntese do Estudo .....	63



<b>4</b>	<b>MODELO MULTICRITÉRIO PARA SELEÇÃO DE PORTFÓLIO .....</b>	<b>65</b>
<b>4.1</b>	<b>Modelo Multicritério para Seleção de Portfólio com Elicitação de Sinergia Individual .....</b>	<b>66</b>
4.1.1	Função Objetivo.....	66
4.1.2	Restrições.....	70
4.1.2.1	Restrições de Recursos .....	70
4.1.2.2	Restrição de Custo .....	71
4.1.2.3	Restrições para Ações Mandatárias .....	71
4.1.2.4	Restrição do Valor de Ações .....	72
4.1.2.5	Restrições Relacionais .....	72
4.1.3	Formulação Geral .....	73
<b>4.2</b>	<b>Modelo de Elicitação de Sinergia Individual.....</b>	<b>74</b>
<b>4.3</b>	<b>Considerações sobre a Elicitação de Sinergias .....</b>	<b>76</b>
<b>4.4</b>	<b>Modelo de Elicitação de Sinergia aos Pares .....</b>	<b>79</b>
4.4.1	Resultados decorrentes da formulação dos modelos.....	83
<b>4.5</b>	<b>Aplicação do Modelo de Elicitação aos Pares.....</b>	<b>89</b>
<b>4.6</b>	<b>Análise de Sensibilidade e Discussão dos Resultados .....</b>	<b>98</b>
4.6.1	Análise de Sensibilidade .....	98
4.6.2	Discussão dos Resultados .....	100
<b>4.7</b>	<b>Conclusões do Capítulo .....</b>	<b>109</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>111</b>
<b>5.1</b>	<b>Trabalhos Futuros .....</b>	<b>112</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – O processo de AMD .....	7
Figura 3.1 – Ranking Parcial.....	61
Figura 3.2 – Ranking Completo .....	62
Figura 3.3 – Plano Gaia.....	63
Figura 4.1 – Fragmentação de sinergias para três ações .....	80
Figura 4.2 – Hipótese simplificadora de fragmentação para três ações.....	80
Figura 4.1 – Matriz de Sinergias .....	96
Figura 4.2 – Gráfico de frequência para o caso de variações de 10% nos valores de sinergias.....	101

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Critérios generalizados para o PROMETHEE .....	14
Tabela 2.2 – Capacidade instalada do SIN .....	35
Tabela 3.1 – Avaliação das Alternativas.....	60
Tabela 3.2 – Pesos dos Critérios .....	60
Tabela 4.1 – Avaliação das medidas .....	94
Tabela 4.2 – Constantes de Escala .....	95
Tabela 4.3 – Custos Estimado das Medidas (em bilhões de unidades monetárias) .....	95
Tabela 4.4 – Portfólios obtidos para o problema com sinergias e sem sinergias.....	98
Tabela 4.5 – Valor das medidas consideradas .....	100
Tabela 4.6 – Portfólios obtidos utilizando a amostra – caso de variações de 10%.....	102
Tabela 4.7 – Sinergias relevantes para o portfólio $p_1$ .....	102
Tabela 4.8 – Sinergias relevantes para o portfólio $p_2$ .....	103
Tabela 4.9 – Tabela de frequências – caso de variações de 15%.....	104
Tabela 4.10 – Portfólios obtidos utilizando a amostra – caso de variações de 20%.....	105
Tabela 4.11 – Tabela de frequências – caso de variações de 20%.....	106
Tabela 4.12 – Sinergias relevantes para o portfólio $p_3$ .....	106
Tabela 4.13 – Sinergias relevantes para o portfólio $p_4$ .....	108

# 1 INTRODUÇÃO

Um dos maiores desafios das nações do século XXI é atingir a sustentabilidade energética. Para tanto, é necessário definir estratégias políticas em vários níveis que direcionem para este objetivo no longo prazo. Este trabalho investiga o que existe na literatura acerca do desenvolvimento de políticas energéticas sustentáveis e propõe o uso de modelos de decisão multicritério para resolver dois problemas relevantes neste contexto: a escolha de fontes alternativas de energia e a seleção de um portfólio de políticas energéticas sustentáveis.

Um problema de portfólio é aquele em que se deseja obter um subconjunto a partir de um conjunto de elementos, considerando as interações entre estes elementos e as sinergias existentes entre eles. Apesar do conceito de sinergia fazer parte da definição do problema de portfólio, os trabalhos que as tratam como parte do problema ainda são escassos na literatura. A consideração de sinergias em um problema de portfólio envolve duas questões: como elicitá-las, ou seja, como obter seus valores, e como incorporá-las ao modelo de decisão. O foco deste trabalho é a problemática de portfólio, em especial o processo de elicitação de sinergias que envolve.

## 1.1 Relevância e contribuição do estudo

A ciência e a engenharia fornecem princípios críticos de orientação para se atingir um futuro de energia sustentável. Conforme afirma o relatório desenvolvido pela *InterAcademy Council* (2007), a ciência fornece a base para um discurso racional sobre compensações e riscos, para selecionar prioridades de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) e para identificar novas oportunidades. A engenharia, através da inexorável otimização das tecnologias mais promissoras, pode apresentar soluções – aprender fazendo está entre seus valores dominantes. Melhores resultados podem ser obtidos se muitos caminhos forem explorados paralelamente, se os resultados forem avaliados com medidas de desempenho real, se esses resultados forem ampla e detalhadamente relatados, e se as estratégias estiverem abertas para revisão e adaptação.

O principal instrumento para fomentar a sustentabilidade energética são as políticas e programas em energia renovável e eficiência energética. De acordo com o relatório do *American Council for an Energy-Efficient Economy* (2007) a Eficiência Energética (EE) e a Energia Renovável (ER) são os dois pilares da energia sustentável. A eficiência é essencial

para abrandar o crescimento da demanda de energia, de modo que aumentar os suprimentos de energia limpa permita fazer cortes significativos no uso de combustíveis fósseis. Se o consumo de energia cresce muito rápido, o desenvolvimento de energias renováveis vai perseguir um alvo ultrapassado. Da mesma forma, a menos que a energia limpa esteja disponível rapidamente, retardar o crescimento da demanda só vai começar a reduzir as emissões totais. A redução do teor de carbono das fontes de energia também é necessária. Portanto, qualquer visão séria de uma economia de energia sustentável requer grandes compromissos tanto em eficiência como em energias renováveis.

Segundo a IEA (do inglês, *International Energy Agency*) (2011a), a geração de energia renovável mundial desde 1990 cresceu em média 2,7% ao ano, o que é inferior ao crescimento de 3% observado na geração total de energia. Enquanto 19,5% da energia mundial em 1990 foi produzida a partir de fontes renováveis, essa participação caiu para 18,5% em 2008. Alcançar a meta de reduzir pela metade as emissões de CO<sub>2</sub> globais relacionadas à energia até 2050 exigirá uma duplicação (em relação aos níveis de hoje) da geração por renováveis até 2020. Energias renováveis não-hídricas terão que avançar a taxas de dois dígitos; a energia eólica deve apresentar uma taxa de crescimento média anual de 17% e a energia solar 22%. Enquanto os níveis estabelecidos foram sendo ultrapassados nos últimos anos, este nível de crescimento elevado deve ser sustentado ao longo prazo (IEA, 2011a).

O desenvolvimento e aplicação de tecnologia são processos que envolvem muitos atores. A decisão sobre que tipos de pesquisa devem ser conduzidos tem particular relevância para o mundo em desenvolvimento, que necessita de sistemas de energia adaptado a circunstâncias específicas e aos usuários. Há uma grande necessidade de inovação tecnológica em energias renováveis nos países em desenvolvimento. Os ambientes operacionais técnicos nesses países são extremamente diferentes daqueles em países industrializados. Tecnologias que amadureceram e foram aperfeiçoadas para a escala de produção, para o mercado e para as condições nos países industrializados podem não ser a melhor escolha para uma menor escala de produção ou ambientes operacionais diferentes muitas vezes encontrados em um país em desenvolvimento. Países em desenvolvimento também devem ter a oportunidade de saltar diretamente para o uso de tecnologias de abastecimento mais limpas, modernas e eficientes (TURKENBURG, 2002).

Neste trabalho, a ciência e a engenharia, através das ferramentas matemáticas propostas, se tornam úteis para abordar questões pertinentes à elaboração de uma política energética

sustentável, considerando também o problema de seleção de fontes de energia alternativas que fomentem este tipo de política.

## 1.2 Objetivo Geral

O objetivo geral do trabalho é desenvolver um modelo de elicitação de sinergias que possa ser utilizado para incorporá-las à seleção de portfólio, visando à aplicação na elaboração de políticas energéticas sustentáveis.

## 1.3 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos da tese são:

- Estudar as abordagens utilizadas para solucionar problemas relacionados a portfólio;
- Realizar um levantamento acerca da implantação de políticas energéticas sustentáveis, principalmente no âmbito nacional;
- Investigar a utilização de métodos de Apoio Multicritério a Decisão no contexto de energia sustentável;
- Propor a aplicação de um método multicritério para a seleção de fontes de energia alternativas, que consiste em um subproblema da seleção de políticas energéticas sustentáveis;
- Analisar a elicitação de sinergias utilizada por um modelo multicritério para seleção de portfólio;
- Desenvolver um modelo para elicitação de sinergias;
- Aplicar o modelo de seleção de portfólio abordado utilizando a elicitação proposta ao problema de seleção de um portfólio de políticas energéticas sustentáveis.

## 1.4 Estruturação da Tese

O trabalho está estruturado da seguinte forma:

- O Capítulo 2, Fundamentação Teórica e Revisão Bibliográfica, primeiramente aborda os principais aspectos da Tomada de Decisão Multicritério e os conceitos relativos à Gestão de Projetos que se relacionam com a problemática de portfólio, tópicos necessários para o entendimento da proposta de trabalho. Em seguida, é realizada uma revisão da bibliografia acerca dos trabalhos que abordam problemas de portfólio, das principais políticas em energia sustentável e dos modelos de decisão em energia sustentável;

- O Capítulo 3, Avaliação de Fontes de Energia Alternativas, apresenta a aplicação de um método multicritério ao problema de seleção de fontes de energia alternativas;
- No Capítulo 4, Modelo Multicritério para Seleção de Portfólio, é apresentado um modelo multicritério para seleção de portfólio baseado na elicitação individual de sinergias. Em seguida, é proposto um modelo de elicitação alternativo e as implicações da proposição do novo modelo são apresentadas. Por fim, o modelo proposto é aplicado a um problema de seleção de portfólio de políticas energéticas sustentáveis e uma análise de sensibilidade é realizada;
- O Capítulo 5, Conclusões e Trabalhos Futuros, traz as principais conclusões advindas da realização da tese e apresenta uma série de sugestão para trabalhos futuros no tema.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo é feita uma breve contextualização da área de estudo em que a tese se baseia. São abordados os métodos de decisão multicritério, a problemática de portfólio e o conceito de sinergia. De posse destes elementos é possível partir para o levantamento dos principais trabalhos relacionados ao tema em estudo. A revisão bibliográfica trata dos problemas de portfólio, políticas em energia sustentável e modelos de decisão em energia sustentável. Por fim, é realizada uma síntese e posicionamento do trabalho.

### **2.1 Fundamentação Teórica**

Primeiramente apresenta-se uma visão geral sobre a abordagem multicritério, enfatizando seus principais aspectos e as correntes de pesquisa que fundamentam os métodos utilizados no presente trabalho. Em seguida, analisa-se em maior detalhe a problemática de portfólio e a relação que estabelece com a Gestão de Projetos. Finalmente, o conceito de sinergias em sistemas é discutido.

#### **2.1.1 Decisão Multicritério**

A palavra decisão é proveniente do latim *decidere*, que significa cortar, romper com algo. Uma decisão é tomada sempre que se tem mais de uma opção para o tratamento ou resolução de um problema, de modo que um curso de ação deve ser eleito em detrimento dos demais (ALMEIDA, 2011).

Para Campello de Souza (2007) uma boa decisão deve ser uma consequência lógica daquilo que se quer (preferências que se tem pelas várias consequências das decisões, as quais podem ser incertas ou distribuídas no tempo), daquilo que se sabe (o conhecimento das grandezas envolvidas e das relações entre elas, ou seja, a informação que se traz ao processo de decisão) e daquilo que se pode fazer (alternativas disponíveis de ação).

Algumas decisões, quando realizadas, baseiam-se em apenas um parâmetro. Contudo, deve-se admitir que os problemas reais raramente se enquadram nesta situação, caracterizando-se na maioria das vezes pela existência de múltiplos parâmetros de decisão. Um problema de decisão caracterizado pela consideração simultânea de múltiplos objetivos ou critérios para a escolha de um curso de ação é denominado um problema de Decisão Multicritério.



No problema de Decisão Multicritério não existe, normalmente, nenhuma decisão, solução ou ação que seja melhor, simultaneamente, para todos os critérios. Neste caso, a tomada de decisão pode ser definida como o esforço para resolver o dilema dos critérios conflituosos, cuja presença impede a existência da solução ótima e conduz à procura da solução de melhor compromisso (ZELENY, 1982).

Nesse contexto, o Apoio Multicritério à Decisão (AMD) – em inglês, *Multicriteria Decision Aid (MCDA)* – surgiu na segunda metade do século XX como um conjunto de técnicas e métodos para auxiliar pessoas e organizações na resolução de problemas de decisão onde vários pontos de vista, frequentemente conflitantes, precisam ser considerados (VINCKE, 1992).

Nos subitens a seguir são apresentados alguns conceitos básicos do AMD: a estrutura do processo de AMD, os atores do processo decisório e as problemáticas de referência. Em seguida são abordados os principais métodos.

#### 2.1.1.1 Estrutura do Processo de Apoio Multicritério à Decisão

Segundo Belton & Stewart (2002), é bastante provável que um processo de AMD esteja inserido em um processo mais amplo de estruturação e resolução de problema, conforme ilustrado na figura 2.1. As fases deste processo compreendem a identificação inicial de um problema ou questão, estruturação deste problema, construção e uso de um modelo para informar e incentivar análises, e por fim o desenvolvimento de um plano de ação.

Embora distintas, as fases apresentam ligações intrínsecas. Antes que qualquer análise seja feita, os vários *stakeholders*, inclusive analistas técnicos e facilitadores, precisam desenvolver um entendimento comum a respeito do problema, da decisão que precisa ser tomada e dos elementos que impactam sobre a decisão. Tais questões são analisadas na fase de estruturação do problema. De posse destas informações, é possível construir um modelo adequado ao problema, para sua posterior aplicação. Uma característica primária do AMD é o desenvolvimento de modelos formais acerca das preferências do decisor, *trade-offs* e objetivos, de forma que as diretrizes das alternativas ou ações em consideração possam ser comparadas umas as outras de uma forma sistemática e transparente. Porém, apenas a análise não resolve o problema de decisão. O AMD está interessado também com a implementação dos resultados, o que significa traduzir a análise em planos de ação específicos.

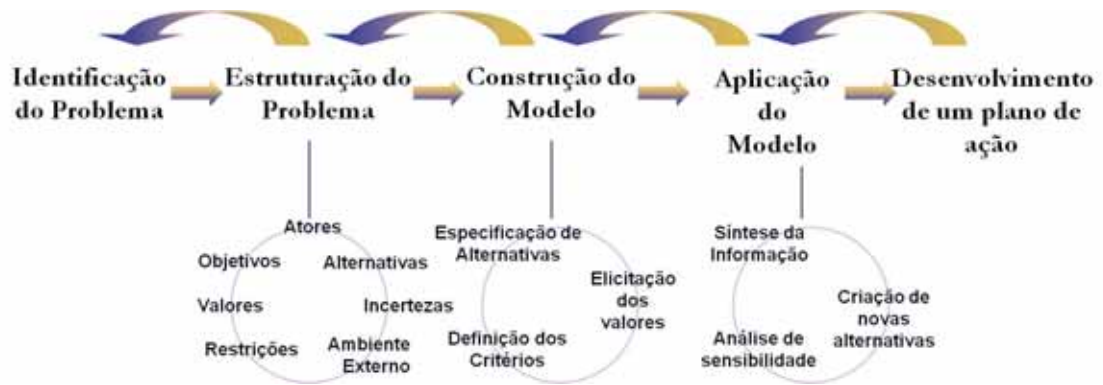


Figura 2.1 – O processo de AMD

Fonte: Adaptado de Belton & Stewart (2002)

### 2.1.1.2 Atores do Processo Decisório

Considera-se como ator de um processo decisório um indivíduo ou um grupo de indivíduos que influencia direta ou indiretamente na decisão. Roy (1996) identifica os seguintes atores:

- Decisor: assume a responsabilidade pelo problema e influencia no processo de decisão de acordo com o juízo de valor que representa e/ou relações que se estabeleceram. Pode ainda não participar do processo de decisão, porém o influencia em função do seu poder de veto;
- Facilitador: é um líder experiente que deve focalizar sua atenção na resolução do problema, coordenando os pontos de vista dos decisores, mantendo os decisores motivados e destacando o aprendizado no processo de decisão. Deve tentar abstrair-se do seu sistema de valor, para não intervir nos julgamentos dos decisores;
- Analista: é responsável pela análise, auxiliando o decisor e facilitador na estruturação do problema e identificação dos fatores do meio ambiente que influenciam na evolução, solução e configuração do problema.

Roy (1996) destaca ainda que existem outros grupos que podem influenciar o processo decisório, dentre estes os *stakeholders*, que não são formalmente responsáveis pela decisão, mas algumas vezes podem participar do processo decisório. É importante destacar também o grupo dos terceiros, que não participam ativamente do processo de decisão, porém são direta ou indiretamente afetados pelas conseqüências, de forma que suas preferências devam ser consideradas pelos decisores.

Segundo Almeida (2011) o especialista pode ser considerado ator do processo decisório, apesar de ser raramente citado na literatura de AMD, mas se fazer presente na literatura da Teoria da Decisão. Consiste no profissional que conhece os mecanismos do comportamento do sistema (ou de um subsistema) objeto de estudo, que influencia variáveis relacionadas ao problema de decisão em questão. Podem existir mais de um especialista para uma mesma variável ou diferentes especialistas para variáveis distintas.

### 2.1.1.3 Problemáticas de Referência

Seja  $A$  um conjunto de alternativas ou ações disponíveis para a resolução de um determinado problema. No contexto do AMD, o resultado a que se pretende chegar na resolução deste problema pode ser identificado de acordo com quatro tipos de problemáticas de referência descritas por Roy (1996):

- *Problemática  $P.\alpha$  ou Problemática de Escolha*: nesta problemática, direciona-se a investigação no sentido de se encontrar um subconjunto  $A'$  de  $A$ , tão restrito quanto possível, visando à escolha final de uma única ação. O resultado pretendido é, portanto, uma escolha ou um procedimento de seleção;
- *Problemática  $P.\beta$  ou Problemática de Classificação*: Apresenta o problema em termos da alocação de cada ação a uma categoria (ou classe). Esta alocação é feita com base nos valores intrínsecos de cada ação em comparação com classes pré-definidas. O resultado pretendido é, dessa forma, uma triagem ou um procedimento de classificação;
- *Problemática  $P.\gamma$  ou Problemática de Ordenação*: As investigações são direcionadas a fim de se determinar uma ordenação parcial ou completa entre os grupos que contêm as ações consideradas equivalentes. Diferentemente da problemática anterior, ( $P.\beta$ ), os grupos de ações nesta problemática não são definidos *a priori*, e a determinação de uma classe é relativa e depende de sua posição na ordem. O resultado pretendido é, portanto, um procedimento de ordenação;
- *Problemática  $P.\delta$  ou Problemática de Descrição*: Esta problemática direciona para a descrição, em uma linguagem apropriada e de uma maneira sistemática e formal, das ações e das suas conseqüências. O resultado a que se quer chegar aqui é uma descrição ou um procedimento cognitivo.

A estas problemáticas, Belton & Stewart (2002) acrescentam duas outras:

- *Problemática de Design*: tem por objetivo procurar, identificar ou criar novas alternativas de decisão de acordo com as metas e aspirações definidas pelo processo de AMD;
- *Problemática de Portfólio*: tem por finalidade a escolha de um subconjunto de alternativas de um grande conjunto de possibilidades, levando em consideração não só as características de cada alternativa individual, mas também a maneira como elas interagem e as sinergias positivas e negativas.

#### 2.1.1.4 Família de Critérios

Um critério pode ser definido como uma função  $g$  sobre o conjunto de ações  $A$ , representando as preferências de um decisor de acordo com um ponto de vista. Em problemas multicritério tem-se uma família de critérios  $F = \{g_1, \dots, g_n\}$ . Uma família consistente de critérios deve atender a várias propriedades, principalmente a de ser capaz de representar todos os aspectos do problema sem que haja redundâncias.

Vincke (1992) classifica os critérios de acordo com a estrutura de preferências verificada:

- Critério Verdadeiro: a estrutura de preferência associada é a pré-ordem completa, que expressa uma noção intuitiva de classificação, com possibilidade de empate por similaridade, onde qualquer diferença implica uma preferência estrita;
- Semi-Critério: a estrutura de preferência associada é a semi-ordem, que corresponde ao modelo com limiar. Nos modelos com limiar existe uma faixa de indefinição nos valores para aceitação de uma relação de preferência. Por exemplo, o limiar de indiferença estabelece uma faixa de indefinição para que se concretize a relação de indiferença;
- Critério de intervalo: associa-se à estrutura de preferência ordem de intervalo, que corresponde ao modelo com limiar variável, o que significa que o limiar varia ao longo da escala de valores;
- Pseudo-Critério: a estrutura de preferência associada é a pseudo-ordem, que corresponde ao modelo de duplo limiar. É necessário estabelecer um limiar de indiferença ( $q$ ), abaixo do qual se verifica a indiferença, e um limiar de preferência ( $p$ ), acima do qual a preferência é estrita, ou seja, não há dúvidas quanto à preferência.

### 2.1.1.5 Métodos de Apoio Multicritério a Decisão

Os métodos de Apoio Multicritério a Decisão procuram esclarecer o processo decisório, tentando incorporar os julgamentos de valores dos agentes de decisão, na intenção de acompanhar a maneira como se desenvolvem as preferências, e entendendo o processo como aprendizagem (ALMEIDA, 2011).

Segundo Roy (1985), o AMD propõe-se a ter visão prescritivista e construtivista dos problemas. A visão prescritivista é uma visão do mundo como este se apresenta, portanto, sob este conceito os modelos depois de prontos são apresentados ao decisor que opta por utilizá-los ou não. Um modelo prescritivista descreve, primeiramente, uma modelagem de preferências, para depois fazer prescrições com base em hipóteses normativas que são validadas pela realidade descrita. A visão construtivista é uma visão do mundo por meio de processos idealizados, sendo os modelos construídos utilizando o processo decisório, o que permite a participação dos atores durante todas as fases do processo de apoio a decisão.

Quanto aos algoritmos dos métodos do AMD, Vincke (1992) fornece uma classificação relativa à teoria principal em que se baseiam:

- Abordagem do Critério Único de Síntese: permite a definição de uma função que busca agregar os valores de cada alternativa sujeita a cada critério. A importância relativa de cada critério advém do conceito de taxa de substituição de um critério em relação ao outro. Esta teoria assume que todos os estados são comparáveis e que existe transitividade nas relações de preferência e indiferença;
- Abordagem de Subordinação e Síntese: busca construir relações de sobreclassificação, as quais representam as preferências estabelecidas pelo decisor, e posteriormente explorá-las de tal forma que auxilie o decisor na solução do problema. Sua principal diferença em relação à abordagem anterior é a permissão da possibilidade de incomparabilidade entre alternativas;
- Abordagem de Métodos Iterativos: propõe métodos que alternam etapas de cálculo (atingindo sucessivas soluções de compromisso) e diálogo (fonte de informações extras acerca das preferências do tomador de decisão). Geralmente utilizam modelagens baseadas em Programação Matemática Multiobjetivo.

Atualmente encontra-se na literatura métodos híbridos, ou seja, que utilizam conceitos de duas ou mais das abordagens anteriores. Desenvolveram-se também outras escolas que não

utilizam os conceitos das abordagens anteriores, como por exemplo, a Escola Holandesa e a PO SOFT (ROSENHEAD, 1989).

A seguir são apresentados alguns dos principais métodos de Apoio Multicritério a Decisão.

#### 2.1.1.5.1 Teoria da Utilidade Multiatributo

A Teoria da Utilidade Multiatributo, freqüentemente denominada de MAUT (do inglês, *Multi-Attribute Utility Theory*), derivou da Teoria da Utilidade, um modelo matemático utilizado para representar a desejabilidade do decisor pelos bens que este poderá obter. Consiste na agregação de diferentes atributos com critério único de síntese, que equivale a uma compensação entre os mesmos, o que segundo Vincke (1992) sugere uma quantidade que contrabalancei a desvantagem em um critério em relação à vantagem em outro. Por este motivo é chamado de método compensatório.

Quando procuramos estabelecer um processo de escolha entre mais de uma alternativa ou ação em um problema de decisão, estamos normalmente buscando maximizar um objetivo. Isso envolve determinar uma medida sobre as conseqüências de um problema.

A Teoria da Utilidade permite avaliar tais conseqüências através de um processo de elicitación de preferências que busca incorporar ao problema o comportamento do decisor em relação ao risco. Esse processo permite criar uma nova escala, a escala de *utilidade*, que estabelece para cada conseqüência um valor de utilidade. A teoria da utilidade permite a modelagem desse comportamento em relação às incertezas existentes nos atributos ou critérios envolvidos no problema e a determinação da função utilidade do atributo.

A utilidade é um valor adimensional atribuído a cada conseqüência e expressa o grau de importância que aquela conseqüência ocupa na preferência geral do decisor. Uma função  $u$ , que associa um número real  $u(x)$  para cada  $x$  no espaço de avaliação, é chamado de função utilidade (unidimensional) se representa a estrutura de preferências do tomador de decisões de forma que:

$$\begin{aligned} a \sim b &\Leftrightarrow u(a) = u(b) \\ a \succ b &\Leftrightarrow u(a) > u(b) \\ a \prec b &\Leftrightarrow u(a) < u(b) \end{aligned} \tag{2.1}$$

Onde  $\sim$  representa uma relação de indiferença entre as conseqüências e  $\succ$  uma relação de preferência.

Segundo Almeida (2011), a eliciação da função utilidade para as conseqüências de um problema de decisão pode ser realizada através de duas técnicas:

- *Avaliação direta* – envolve inicialmente a identificação pelo decisor das conseqüências de maior e menor preferência ( $x^*$  e  $x^o$ , respectivamente), que serão os valores extremos da escala. Os demais valores são obtidos através da determinação da probabilidade de indiferença ( $\pi$ ) entre cada conseqüência e a loteria  $\langle x^*, \pi, x^o \rangle$  (onde  $\pi$  é a probabilidade de obter a conseqüência  $x^*$  e  $(1-\pi)$  é a probabilidade de obter a conseqüência  $x^o$ ). Esta técnica se limita a problemas com poucas conseqüências;
- *Levantamento da Função Utilidade* – É baseado no procedimento da avaliação direta, porém permite que, a partir da utilidade de algumas conseqüências, seja ajustada uma curva cuja equação, denominada de Função Utilidade, possibilite determinar a utilidade de qualquer conseqüência no intervalo predefinido. É aplicada a problemas com um número maior de conseqüências.

No conjunto de métodos de Apoio Multicritério a Decisão o MAUT é o único que recebe o nome de teoria. Esta distinção está associada à forma como se obtém a função utilidade multiatributo. Como teoria, a determinação da função está associada à confirmação da relação que existe entre a estrutura axiomática da teoria e a estrutura de preferências do decisor. Como método, esta confirmação não é efetuada, pelo menos em alguns estágios do processo de análise (ALMEIDA, 2011).

#### 2.1.1.5.2 Família de métodos PROMETHEE

O PROMETHEE (do inglês, *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation*) pertence à classe dos métodos de sobreclassificação e baseia-se em duas etapas: (1) construção de uma relação de sobreclassificação, agregando informações entre os critérios e as alternativas e (2) exploração dessa relação para apoio à decisão (BRANS & MARESCHAL, 2002). A etapa de construção engloba o Enriquecimento da Estrutura de Preferência, na qual a noção de critério generalizado é introduzida com a finalidade de captar a amplitude das diferenças entre as avaliações de cada um dos critérios; e o Enriquecimento da Estrutura de Dominância, onde é estabelecido, para cada par de ações, um grau de preferência global de uma ação sobre a outra. Na fase de exploração tem-se o Apoio a Decisão, no qual a relação de sobreclassificação de valor é explorada visando esclarecer melhor o decisor acerca do desempenho de cada alternativa.

No Enriquecimento da Estrutura de Preferência as comparações entre pares de ações do conjunto de ações  $A$  dão lugar a uma relação de dominância natural (I, P), tal que:

$$\forall a, b \in A : \begin{cases} g_j(a) > g_j(b) \Leftrightarrow aP_j b \\ g_j(a) = g_j(b) \Leftrightarrow aI_j b \end{cases} \quad (2.2)$$

No caso de comparações paritárias, observam-se as diferenças entre os valores das alternativas dentro de cada critério  $j$ :

$$d_j(a, b) = g_j(a) - g_j(b) \quad (2.3)$$

Para pequenas diferenças, o decisor posicionará uma pequena preferência para a melhor alternativa, enquanto que para grandes diferenças, uma maior preferência será posicionada. Essas preferências assumirão um número real variando entre zero e um, o que significa que para cada critério  $g_j(\cdot)$ , o decisor terá uma função do tipo:

$$P_j(a, b) = P_j[d_j(a, b)] \quad a, b \in A, \text{ onde } 0 \leq P_j(a, b) \leq 1 \text{ e} \quad (2.4)$$

$$\begin{cases} d_j(a, b) \leq 0 \Rightarrow P_j(a, b) = 0 \\ d_j(a, b) > 0 \Rightarrow P_j(a, b) \approx 0 \\ d_j(a, b) \gg 0 \Rightarrow P_j(a, b) \approx 1 \\ d_j(a, b) \gg \gg 0 \Rightarrow P_j(a, b) = 1 \end{cases}$$

Onde  $P_j(a, b) = 0$  denota uma inexistência de preferência,  $P_j(a, b) \approx 0$  uma preferência fraca,  $P_j(a, b) \approx 1$  uma preferência forte e  $P_j(a, b) = 1$  uma preferência estrita.

O par  $\{g_j(a), P_j(a, b)\}$  é chamado critério generalizado associado ao critério  $g_j(\cdot)$ . Trata-se simplesmente do critério de avaliação completado pela sua função de preferência. É uma informação complementar importante. Brans & Mareschal (1992) propõem um conjunto de seis tipos de critério generalizado ao decisor, que podem ser visualizados na tabela 2.1. A escolha é feita interativamente pelo analista e pelo decisor, levando-se em conta os graus de preferência em função das diferenças observadas. Em cada caso é preciso fixar no máximo dois parâmetros.

No critério do tipo I, ou Usual, qualquer diferença entre a avaliação das alternativas em um determinado critério implica numa situação de preferência estrita. A situação de indiferença ocorre quando duas alternativas apresentam desempenho equivalente. Nenhum



parâmetro precisa ser determinado pelo decisor e o sistema relacional de preferência é uma pré-ordem completa.

Tabela 2.1 – Critérios generalizados para o PROMETHEE

Tipo de Função de Preferência	Se	Então
<b>I – Critério Usual</b> (não há parâmetro a ser definido)	$g_j(a) - g_j(b) > 0$ $g_j(a) - g_j(b) \leq 0$	$P_j(a,b) = 1$ $P_j(a,b) = 0$
<b>II – Quase-Critério</b> (define-se o parâmetro $q$ )	$g_j(a) - g_j(b) > q$ $g_j(a) - g_j(b) \leq q$	$P_j(a,b) = 1$ $P_j(a,b) = 0$
<b>III – Preferência Linear</b> (define-se o parâmetro $p$ )	$g_j(a) - g_j(b) > p$ $0 < g_j(a) - g_j(b) \leq p$ $g_j(a) - g_j(b) \leq 0$	$P_j(a,b) = 1$ $P_j(a,b) = [g_j(a) - g_j(b)] / p$ $P_j(a,b) = 0$
<b>IV – Pseudo-Critério</b> (definem-se os parâmetros $q$ e $p$ )	$g_j(a) - g_j(b) > p$ $q < g_j(a) - g_j(b) \leq p$ $g_j(a) - g_j(b) \leq q$	$P_j(a,b) = 1$ $P_j(a,b) = 1/2$ $P_j(a,b) = 0$
<b>V – Área de Indiferença</b> (definem-se os parâmetros $q$ e $p$ )	$g_j(a) - g_j(b) > p$ $q < g_j(a) - g_j(b) \leq p$ $g_j(a) - g_j(b) \leq q$	$P_j(a,b) = 1$ $P_j(a,b) = [ g_j(a) - g_j(b)  - q] / (p - q)$ $P_j(a,b) = 0$
<b>VI – Critério Gaussiano</b> (o desvio padrão deve ser fixado)	$g_j(a) - g_j(b) > 0$ $g_j(a) - g_j(b) \leq 0$	$P_j(a,b) = 1 - e^{-(g_j(a) - g_j(b))^2 / 2s_j^2}$ $P_j(a,b) = 0$

Fonte: adaptado de Brans & Mareschal (1992)

O Quase-Critério considera as alternativas indiferentes enquanto a diferença entre as suas avaliações não ultrapassa o limiar de indiferença  $q$ ; acima deste limiar, a preferência é estrita. Um só parâmetro ( $q$ ) deve ser fixado. Este tipo de critério está relacionado à noção de semi-ordem.

O critério de Preferência Linear permite ao decisor preferir  $a$  e  $b$  em função da diferença observada entre  $g_j(a)$  e  $g_j(b)$ , onde o grau de preferência cresce linearmente até que o limiar de preferência  $p$  seja atingido. Após esse limiar, a preferência é estrita.

No critério Tipo IV  $a$  e  $b$  são consideradas como indiferentes até que a diferença entre  $g_j(a)$  e  $g_j(b)$  não ultrapasse  $q$ ; entre  $q$  e  $p$ , o grau de preferência é fraco e acima de  $p$  a preferência se torna estrita. Brans & Mareschal (2002) afirmam que esse critério generalizado é usado com frequência quando, no início do procedimento, as avaliações são apreciações qualitativas. Como o método PROMETHEE requer avaliação numérica, é feita uma conversão de escala, de forma que a diferença entre os níveis consecutivos possua a mesma

amplitude. Feito isso, pode-se, por exemplo, proceder de forma que uma diferença de um nível dê lugar a uma indiferença; uma diferença de dois níveis a uma preferência fraca e uma diferença de três níveis ou mais dê lugar a uma preferência estrita.

No caso do Critério Tipo V, semelhantemente ao Tipo IV,  $a$  e  $b$  são consideradas indiferentes até que a diferença entre  $g_j(a)$  e  $g_j(b)$  não ultrapasse  $q$ . Acima desse limiar o grau de preferência cresce linearmente com esta diferença, até atingir a preferência estrita a partir de  $p$ . No critério do Tipo VI, o critério Gaussiano, a preferência aumenta segundo uma distribuição normal, e, portanto, o desvio-padrão ( $s_j$ ) deve ser fixado, além dos parâmetros  $q$  e  $p$ .

Uma vez que se tenha determinado as avaliações de cada alternativa, os pesos dos critérios e os critérios generalizados pode ser dado início ao procedimento PROMETHEE.

Estabelecidas as intensidades das preferências, obtém-se então o índice de preferência multicritério (grau de sobreclassificação)  $[\pi(a,b)]$ , que é calculado para cada par ordenado de alternativas pela seguinte expressão:

$$\pi(a,b) = \sum_{j=1}^k P_j(a,b) \times p_j \quad \text{onde} \quad \sum_{j=1}^k p_j = 1 \quad (2.5)$$

com  $p_j > 0$  e onde  $j=1,2,\dots,k$ , são os pesos representando a importância relativa de cada critério.

Segundo Brans & Mareschal (2002), o grau de sobreclassificação  $[\pi(a,b)]$  expressa como e com que grau  $a$  é preferível a  $b$  sobre todos os critérios; e  $[\pi(b,a)]$  expressa como  $b$  é preferível a  $a$ . Tanto  $\pi(a,b)$  quanto  $\pi(b,a)$  são normalmente positivos. Verifica-se que:

$$\begin{cases} \pi(a,a) = 0 \\ 0 \leq \pi(a,b) \leq 1 \end{cases} \quad \forall a,b \in A \quad (2.6)$$

Sendo claro que:

- $\pi(a,b) \sim 0$  implica em uma preferência global de  $a$  sobre  $b$ ;
- $\pi(a,b) \sim 1$  implica em uma forte preferência global de  $a$  sobre  $b$ .

Com o intuito de explorar essa relação de sobreclassificação para apoiar decisões, foi proposta a idéia de fluxos de sobreclassificação, que fornecem uma noção de como cada alternativa de  $A$  se comporta diante das  $(n-1)$  outras ações:

– *Fluxo positivo de sobreclassificação* [ $\Phi^+(a)$ ] – chamado de *fluxo de saída*, representa a média de todos os graus de sobreclassificação de  $a$  com respeito a todas as outras alternativas, dada pela expressão:

$$\Phi^+(a) = \sum_{\substack{b=1 \\ b \neq a}}^n \frac{\pi(a,b)}{n-1} \quad (2.7)$$

Expressa a intensidade de preferência de  $a$  sobre todas as outras alternativas, portanto, quanto maior for  $\Phi^+(a)$ , melhor a alternativa.

– *Fluxo negativo de sobreclassificação* [ $\Phi^-(a)$ ] – chamado de *fluxo de entrada*, representa a média de todos os graus de sobreclassificação de todas as outras alternativas com respeito a  $a$ , dada pela expressão:

$$\Phi^-(a) = \sum_{\substack{b=1 \\ b \neq a}}^n \frac{\pi(b,a)}{n-1} \quad (2.8)$$

Esse fluxo representa a intensidade de preferência de todas as outras alternativas sobre  $a$ , portanto, quanto menor o valor dele, melhor a alternativa.

– *Fluxo Líquido de sobreclassificação* [ $\Phi(a)$ ] – expressa o balanço entre o poder e a fraqueza da alternativa. Quanto maior  $\Phi(a)$ , melhor a alternativa. É dado por:

$$\Phi(a) = \Phi^+(a) - \Phi^-(a) \quad (2.9)$$

O fluxo líquido pode ser positivo ou negativo. No caso onde é positivo, a ação sobreclassifica mais as outras do que é sobreclassificada, ou seja, expressa a vantagem dessa alternativa sobre todas as outras; caso contrário, o fluxo líquido será negativo.

As implementações do PROMETHEE são descritas na literatura (BRANS & MARESCHAL, 2002):

- PROMETHEE I – onde a interseção entre os fluxos estabelece uma relação de sobreclassificação parcial entre as alternativas;
- PROMETHEE II – classifica as alternativas, estabelecendo uma ordem decrescente do fluxo líquido, o que fornece uma ordem completa entre as alternativas;

- PROMETHEE III e IV – desenvolvidos para o tratamento de problemas de decisão mais sofisticados, em particular com um componente estocástico. O PROMETHEE IV envolve o caso de um conjunto contínuo de ações  $A$  que surge quando as ações são, por exemplo, percentagens, dimensões de um produto, investimentos, etc;
- PROMETHEE V – neste método, após estabelecer-se uma ordem completa entre as alternativas (PROMETHEE II), são introduzidas restrições, identificadas no problema, para as alternativas selecionadas, incorporando-se uma filosofia de otimização inteira;
- PROMETHEE VI – desenvolvido para suportar o contexto de quando o decisor não está apto ou não quer definir os pesos para os critérios, podendo-se especificar intervalos de possíveis valores em vez de um valor fixo para cada peso;
- PROMETHEE-GAIA – o procedimento GAIA (*Geometrical Analysis for Interactive Aid*) consiste em um módulo de interação visual complementar ao PROMETHEE. O plano GAIA fornece informação gráfica clara sobre o caráter conflitante dos critérios e sobre o impacto dos pesos na decisão final, permitindo o uso de várias ferramentas de sensibilidade que enriquecem a visão que o decisor tem do problema em questão (MARESCHAL & BRANS, 1988). Portanto, enquanto as análises do PROMETHEE I e II são mais prescritivas, o GAIA é mais descritivo e graficamente orientado.

#### 2.1.1.5.3 Outros Métodos

Além do MAUT outros métodos utilizam o procedimento de agregação aditivo, distinguindo-se entre si, principalmente, pelo processo de modelagem de preferências (ALMEIDA, 2011). Entre estes, pode-se citar o MAVT (FISHBURN, 1967; KEENEY & RAIFFA, 1976), UTA (JACQUET-LAGRÈZE & SISKOS, 1982), AHP (SAATY, 1980) e o SMARTS e a sua variante SMARTER (EDWARDS & BARRON, 1994).

Quando não há uma situação de incerteza, que envolva o uso de probabilidades, não há muito sentido no uso do MAUT. Neste caso utiliza-se o MAVT (do inglês, *Multi-Attribute Value Theory*) que se distingue do MAUT por não utilizar probabilidades, assumindo a hipótese de que há certeza na obtenção das consequências, para cada alternativa considerada.

O UTA (*Utilité Additive*) é um método de desagregação de preferências com base em uma função valor aditiva. Consiste em primeiro determinar uma função utilidade ótima através da programação linear e em seguida realizar uma análise de sensibilidade.

O AHP (do inglês, *Analytic Hierarchy Process*) criado por Thomas L. Saaty apresenta um procedimento próprio para modelagem das preferências do decisor. Nele, o problema de

decisão é representado por uma hierarquia em cujo nível mais alto se encontram os objetivos finais, seguidos pelos critérios e por último pelas alternativas. Os fundamentos axiomáticos deste método supõem que deve haver independência entre os diferentes níveis hierárquicos e elementos.

No AHP um julgamento comparativo é realizado em cada nível da hierarquia, considerando-se a contribuição de cada elemento em relação aos elementos do nível hierárquico imediatamente superior. Utiliza-se uma escala numérica para realizar a avaliação entre os pares. Se a comparação é entre alternativas, o julgamento é feito baseado em razões de preferências. No caso da comparação entre critérios, utilizam-se razões de importância (VINCKE, 1992).

O SMARTS (do inglês, *Simple Multiattribute Rating Technique*) foi desenvolvido com o objetivo de prover uma maneira simples para implementar os princípios da Teoria da Utilidade Multiatributo. Este método utiliza o procedimento *swing weights* para a obtenção das constantes de escala, além de considerar funções valor lineares para avaliação intra-critério, simplificando as hipóteses no processo de análise. O método *swing* para obtenção dos pesos consiste em considerar uma alternativa hipotética que tenha o pior desempenho em todos os critérios, recebendo portanto valor zero. Diante da hipótese de que esta alternativa deve ser escolhida, o decisor é perguntado sobre qual critério gostaria que apresentasse valor máximo. Isso é feito para todos os critérios, o que fornece uma ordem de importância destes. Finalmente, os pesos são atribuídos em uma escala de 100 pontos e em seguida normalizados.

O método SMARTS é largamente utilizado devido à simplicidade tanto das respostas exigidas pelo decisor como também da análise que é feita sobre estas respostas. A análise envolvida é bastante transparente, o bastante para produzir um ganho de entendimento sobre o problema e ser aceitável ao decisor.

O SMARTER, variante do método SMART, é conduzido nas mesmas etapas utilizadas para o SMART, exceto para a obtenção de pesos. No SMARTER, a partir da ordem de importância dos critérios obtida no procedimento de *swing* utiliza-se o procedimento ROC (*Ranking Ordered Centroid*), um procedimento proposto para transformar a informação de ordem dos critérios em pesos, sem que seja feita uma avaliação adicional com o decisor.

Entre os métodos de sobreclassificação, além do PROMETHEE, os métodos ELECTRE são amplamente utilizados. A família ELECTRE (do francês, *Elimination et Choix Traduisant la Réalité*) é uma família de métodos de origem francesa, inicialmente proposta por Benayoun, Roy e Sussman em 1966 e posteriormente desenvolvida por Bernard Roy.

Os métodos ELECTRE exploram o conceito de dominância. Estes métodos baseiam-se na eliminação do subconjunto de alternativas menos desejáveis para escolher as alternativas mais preferíveis, em relação a maioria dos critérios. Para construir a relação de sobreclassificação utilizam índices de concordância e discordância, que são obtidos a partir de ponderações dos pesos. O índice de concordância mede a vantagem relativa de cada alternativa sobre as demais. De forma similar é definido um índice de discordância, que mede a relativa desvantagem (VINCKE, 1992). Assume-se que o decisor é capaz de fornecer informações intercritérios, representadas pelos pesos.

A família ELECTRE é composta por um conjunto de métodos, cada um aplicável a uma situação diferente. Estes são:

- Método ELECTRE I – procura selecionar um conjunto de alternativas dominantes. É indicado para problemática de escolha ( $P.\alpha$ );
- Método ELECTRE II – resulta num ranking das alternativas não dominadas, sendo indicado para problemática de ordenação ( $P.\gamma$ );
- Método ELECTRE III – aplicável aos casos onde a família do pseudo-critério é agregada. Usado para problemática de ordenação ( $P.\gamma$ );
- Método ELECTRE IV – usado para problemática de ordenação ( $P.\gamma$ ), sem uso de pesos para os critérios;
- Método ELECTRE IS – indicado para problemáticas de escolha ( $P.\alpha$ ) e para a família de estrutura de pseudo-critério;
- Método ELECTRE TRI – Usado para problemática de classificação ( $P.\beta$ ) em que o objetivo é dividir as alternativas em categorias distintas a partir de seus valores intrínsecos.

### 2.1.2 A Problemática de Portfólio e sua relação com a Gestão de Projetos e Programas

Da forma como é definida, a problemática de portfólio aplica-se a um conjunto de alternativas possíveis, independente da natureza destas alternativas. No contexto do Gerenciamento de Projetos um portfólio refere-se a um conjunto de projetos ou programas e outros trabalhos, agrupados para facilitar o gerenciamento eficaz, a fim de atingir os objetivos desejados. Neste ponto, torna-se imprescindível definir projetos e programas, para que seja possível analisar suas principais características e as implicações para a composição de um portfólio.

O *Project Management Institute* (PMI) (2008) considera projeto um empreendimento temporário executado para criar um produto, serviço ou resultado exclusivo. Meredith & Mantel (1995) afirmam que projeto é uma tarefa específica e finita a ser concluída. Segundo Archer & Ghasemzadeh (1999), projeto pode ser definido como um esforço complexo, composto por atividades relacionadas, executadas por várias organizações, com objetivo, programação e orçamento bem definidos.

A natureza temporária indica um início e um término definidos, porém não significa necessariamente curta duração. Além disso, geralmente o termo temporário não se aplica ao produto, serviço ou resultado criado pelo projeto, pois a maioria dos projetos é realizada para criar um resultado duradouro. Apesar de gerar um produto, serviço ou resultado exclusivo, elementos repetitivos podem estar presentes em algumas entregas do projeto, contudo essa repetição não muda a singularidade fundamental do trabalho do projeto.

Um projeto pode criar um produto que seja um item final ou um item componente de outro item. Isto se aplica também a serviços e resultados gerados. Um resultado pode ser um documento, um processo ou conhecimento.

O gerenciamento de projetos é a aplicação de conhecimentos, habilidades, ferramentas e técnicas às atividades do projeto a fim de atender aos seus requisitos. Devido ao potencial de mudança, o plano de gerenciamento do projeto é iterativo e passa por uma elaboração progressiva no decorrer do ciclo de vida do projeto. A gestão de projetos pode ocorrer em um contexto mais amplo, regido pelo gerenciamento de programas e gerenciamento de portfólios.

Em algumas situações um projeto precisa ser subdividido em partes, ou subprojetos, para facilitar o gerenciamento e controle. Os subprojetos são responsáveis por uma pequena parte do projeto total ou por fases extremamente específicas do projeto, que podem, na maioria das vezes, ser terceirizadas ou desenvolvidas por grupos isolados (VARGAS, 2005).

Um programa é definido pelo PMI (2008) como um grupo de projetos relacionados gerenciados de modo coordenado para obtenção de benefícios e controle que não estariam disponíveis se eles fossem gerenciados individualmente. Os programas podem incluir elementos de trabalho relacionado fora do escopo de projetos distintos no programa. Um projeto pode ou não fazer parte de um programa, mas um programa sempre terá projetos.

Cabe neste ponto abordar a diferença entre um projeto composto por subprojetos e um programa. Um subprojeto não tem sentido se tratado isoladamente, é necessária a execução do todo para que a parte seja útil. Por outro lado, em um programa cada projeto atinge seu objetivo isoladamente, o que contribui para atingir as metas do programa, porém, se outros

projetos do programa não forem bem sucedidos isto não implica em inutilidade do projeto concluído, pois seu resultado será obtido independentemente.

O gerenciamento de programas é definido como o gerenciamento centralizado e coordenado de um programa para atingir os objetivos e benefícios estratégicos do mesmo. Os projetos dentro de um programa são relacionados através do resultado comum ou da capacidade coletiva. Se a relação entre projetos for somente a de um cliente, vendedor, tecnologia ou recurso compartilhado, o esforço deve ser gerenciado como um portfólio de projetos e não como um programa.

O gerenciamento de programas se concentra na interdependência do projeto e ajuda a determinar a melhor abordagem para gerenciá-los. As ações relacionadas a essas interdependências podem incluir (PMI, 2008):

- Solução de restrições e/ou conflitos de recursos que possam afetar múltiplos projetos no sistema;
- Alinhamento da orientação estratégica/organizacional que afeta as metas e objetivos do projeto e do programa;
- Solução de problemas e gerenciamento de mudanças em uma estrutura de governança compartilhada.

O gerenciamento de portfólios se refere à gestão centralizada de um ou mais portfólios, o que engloba identificação, priorização, autorização, gerenciamento e controle de projetos, programas e outros trabalhos relacionados, para atingir objetivos de negócios estratégicos específicos. O gerenciamento de portfólios se concentra em garantir que os projetos e programas sejam analisados a fim de priorizar a alocação de recursos, e que o gerenciamento do portfólio seja consistente e esteja alinhado às estratégias organizacionais. A problemática de portfólio, ou simplesmente seleção de portfólio, está relacionada à atividade de identificação da Gestão de Portfólio.

### 2.1.3 Conceitos sobre Sinergia em Sistemas

Conforme Belton e Stewart (2002), a problemática de portfólio deve considerar as possíveis sinergias existentes. A Teoria Geral de Sistemas define sinergia como uma característica inerente a um sistema. Corning (1998) considera que sinergia pode ser amplamente definida como efeitos combinados ou cooperativos, isto é, são os efeitos produzidos por partes, elementos ou indivíduos que operam conjuntamente. Esse efeito



sinérgico é um dos atributos centrais e mais importante de um sistema, mas é por vezes difícil de identificar (Katz e Kahn, 1978; Graczyk, 1993; Shenhar, 1991).

Na tentativa de definir um sistema, Brown (1981) menciona a necessidade de levar em consideração os atributos sinérgicos do sistema: *“Um sistema é definido como uma organização de partes em interação dinâmica. As propriedades de um sistema consistem em mais que a agregação da proporção das partes individuais; o todo organizado é mais do que a soma das partes”* (p.292).

O'Connor & McDermott (1997) também se referem ao aspecto sinérgico do sistema: *“Quando você olha para os padrões que ligam as partes ao invés de simplesmente para as próprias partes, um fato notável emerge. Sistemas feitos de partes muito diferentes com funções completamente diferentes seguem as mesmas regras gerais de organização. Seu comportamento depende de como as partes estão ligadas, ao invés do que as peças são”* (p. 3). E *“Sistemas têm propriedades emergentes que não são encontradas em suas partes. Você não pode prever as propriedades de um sistema completo tomando ele por partes e analisando suas partes”* (p. 7).

O termo sinergia é frequentemente associado à premissa *“o todo é maior do que a soma de suas partes”* (que remonta a Aristóteles em *A Metafísica*) ou *“2 + 2 = 5”*, mas, essa é uma definição restrita, e talvez até mesmo enganosa, de um conceito multifacetado. É preferível dizer que os efeitos produzidos pelo todo são diferentes do que as partes podem produzir sozinhas.

Outro ponto fundamental sobre o conceito de sinergia é que é neutro a valores. Ao longo dos anos vários escritores têm comparado o termo com o mutualismo, ou mesmo altruísmo. No entanto, essa comparação não é correta. Sinergia refere-se a efeitos combinados de todos os tipos. Estes efeitos podem ser considerados eufuncionais (sinergia positiva), disfuncionais (sinergia negativa), ou mesmo neutros, dependendo do contexto (CORNING, 1998).

Entre outras coisas, sinergia engloba fenômenos emergentes, complementaridade funcional e estrutural, divisão do trabalho, efeitos de limiar, transições de fase, simbioses, simetrias, coevolução, heterose, interações, cooperação, epistasia, efeitos sistêmicos, até mesmo *“atratores dinâmicos”* (CORNING, 1998). A sinergia desloca nosso foco teórico dos mecanismos, objetos ou entidades discretas limitada para as relações entre as coisas, e, mais importante, para os efeitos funcionais que essas relações produzem. A causalidade sinérgica é configuracional; efeitos sinérgicos são sempre co-determinados.

A sinergia é real. Seus efeitos são mensuráveis ou quantificáveis: por exemplo, economias de escala, maior eficiência, custos reduzidos, rendimentos maiores, menores taxas de mortalidade, etc. Manifestações mais sutis incluem propriedades de estabilidade melhoradas, maior tolerância ao *stress*, a fusão de complementaridades funcionais para alcançar novas propriedades, e assim por diante.

Diante do exposto, pode-se afirmar que, no âmbito da seleção de portfólio, diz-se que há sinergia entre os projetos se estes produzem efeitos combinados, ou seja, se o valor total do portfólio contendo estes projetos for maior ou menor do que a soma dos valores individuais dos respectivos projetos.

## 2.2 Revisão Bibliográfica

Esta revisão está dividida em três seções. A primeira seção traz um levantamento dos trabalhos existentes na literatura que abordam problemas relacionados a portfólio. A segunda seção apresenta um levantamento das principais políticas em energia sustentável, seguido de um levantamento dos programas em energia sustentável adotados no Brasil. A terceira seção trata dos modelos de decisão em energia sustentável existentes na literatura.

### 2.2.1 Portfólio

Existem diferentes métodos que podem ser aplicados aos problemas de portfólio, alguns dos quais concebidos a mais de duas décadas. Um problema de portfólio pode ser abordado segundo quatro paradigmas distintos: avaliação, alocação, seleção e construção. A escolha do paradigma a ser utilizado está atrelada à forma do resultado que se deseja obter e influencia diretamente a metodologia a ser utilizada. A avaliação de portfólio visa uma mensuração do mesmo segundo dimensões de interesse; A alocação diz respeito à atribuição de portfólios a diferentes categorias ou elementos; A seleção de portfólio se refere à escolha de um portfólio ou dos elementos que irão compor determinado portfólio; Por fim, a construção remete à definição da composição do portfólio, ou seja, deseja-se definir as parcelas cabíveis a cada elemento do portfólio.

A primeira área de estudo que se propôs a solucionar problemas de portfólio foi a economia. A abordagem econômica de otimização de portfólio remonta ao trabalho seminal de Markowitz (1952), o qual propõe uma metodologia para a construção de portfólios de investimentos eficientes com base no *trade-off* entre o retorno esperado de um portfólio e seu risco associado, medido em termos da variância do portfólio. Esta metodologia ficou

conhecida como modelo da Média-Variância e a teoria que fornece seus alicerces foi denominada Teoria Moderna do Portfólio.

A Teoria Moderna do Portfólio abriu espaço para a formulação de modelos baseados na formulação de Markovitz (por exemplo, COHEN & POGUE, 1967). Outros modelos baseados em medidas econômicas quantitativas foram aplicados para avaliação de portfólios. Os principais índices utilizados são o retorno do investimento, taxa mínima de retorno, taxa mínima de atratividade e valor presente líquido.

A abordagem econômica se aplica a investimentos de naturezas diversas: militares (YANG *et al.*, 2011), mercado de ações (KONNO & KOBAYASHI, 1997), seguros (IRGENS & PAULSEN, 2004), Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) (GRAVES & RINGUEST, 1991), energia (ROCHA & KUHN, 2011), entre outros.

No contexto político, Austen-Smith & Banks (1990) dispuseram dos conceitos da Teoria dos Jogos para desenvolver um modelo de alocação de portfólio para formação de governo e decisão política em legislaturas multipartidárias. Em particular, se concentram em alocações de portfólio estáveis, onde uma alocação estável é aquela que gera uma política que nenhuma coalizão legislativa está disposta ou é capaz de anular.

O desenvolvimento de estudos relativos à Gestão de Projetos gerou uma nova necessidade: selecionar projetos ou programas para compor um portfólio com base não apenas em critérios financeiros, mas envolvendo outros critérios quantitativos e até mesmo qualitativos. Inicialmente houve uma tendência de converter os atributos de um projeto em um valor monetário único. Contudo, estes modelos não se demonstraram satisfatórios e careciam de dados de entrada. Moore & Baker (1969) abordam este problema e enfatizam a importância do processo de reunião de informação como função de um modelo. Tal requisito se tornou um grande incentivo à utilização dos métodos de Pesquisa Operacional para resolver este problema.

Ghasemzadeh & Archer (2000) afirmam que as dificuldades associadas à seleção de portfólio de projetos têm origem em certos fatores: (1) a presença de objetivos múltiplos e conflitantes; (2) alguns objetivos podem ser qualitativos; (3) incerteza e risco podem afetar os projetos; (4) pode ser necessário balancear o portfólio selecionado em relação a fatores importantes, por exemplo, risco e tempo para conclusão; (5) pode haver interdependência entre projetos; (6) o número de portfólios possíveis é frequentemente elevado. Além disso, pode haver restrições devido à limitação de recursos e a disponibilidade e o consumo de

recursos podem não ser uniformes ao longo do tempo, tornando o problema ainda mais complexo.

No contexto dos métodos de AMD, existe uma alternativa para a seleção de portfólio utilizando a abordagem não compensatória, que é o PROMETHEE V (BRANS & MARESCHAL, 1992). Outras abordagens baseadas no PROMETHEE são também propostas para resolver o problema de portfólio (VETSCHERA & ALMEIDA, 2012), apresentando uma performance superior ao do PROMETHEE V clássico. Outra questão sobre o PROMETHEE V está associada à escala que deve ser alterada com cuidado, conforme ALMEIDA & VETSCHERA (2011).

Segundo Coffin & Taylor III (1996) existe uma enorme quantidade de modelos quantitativos e qualitativos presentes na literatura que se propõem a resolver o problema de seleção de portfólio de projetos. Contudo, poucos são os trabalhos que tratam este problema considerando sinergias.

Abordaremos inicialmente alguns trabalhos que não consideram a questão das sinergias e em que os projetos são independentes, ou seja, são aqueles cuja contribuição independe de outros projetos.

Um estudo da seleção de projetos aplicado a uma companhia aeroespacial foi elaborado por Apperson *et al.* (2005). Foram utilizados questionários para obter a opinião de especialistas sobre os impactos potenciais, adequação estratégica, risco técnico e prazo para conclusão das tecnologias consideradas. *Scores* foram originados a partir dessas respostas através de uma função de agregação aditiva, de modo a compor a avaliação de cada tecnologia. Em seguida, os projetos são ordenados e extraem-se dessa ordem os projetos melhor avaliados, os quais servirão de ponto de partida para discussões de um comitê de seleção. É válido ressaltar que esta abordagem constitui uma adaptação de um método de priorização ao problema de seleção e que tal adaptação é possível para diversos outros métodos de priorização.

Linton *et al.* (2002) propõem o uso da metodologia de Análise Envoltória de Dados ou DEA (do inglês, *Data Envelopment Analysis*) para classificar projetos em três subgrupos: aceitos, considerados para maiores análises e rejeitados. Em seguida, os projetos considerados para maiores análises são examinados utilizando-se um método subjetivo, o VCM (do inglês, *Value Creation Model*). DEA é uma formulação de programação linear introduzida por Charnes *et al.* (1978), cujo conceito básico é a medição de performance de uma unidade de tomada de decisão (DMU, do inglês *Decision-Making Unit*) em relação a um ponto projetado

na fronteira de eficiência. Na aplicação à seleção de projetos formulada projetos de P&D são as DMUs. O método DEA é usado para classificar os projetos e identificar os “projetos eficientes”, que são aqueles superiores aos outros projetos em todas as dimensões, para então estabelecer um *ranking* do potencial relativo dos outros projetos. Por fim, são identificados os projetos que podem ser aceitos ou rejeitados sem análise adicional e um terceiro grupo – o dos projetos a serem considerados para análise por gerentes de P&D – na qual é utilizada a ferramenta de suporte visual sugerida, o VCM.

Um modelo adaptado da literatura de otimização de portfólio financeiro é proposto por Ringuest *et al.* (2004). O método fornece um meio prático para selecionar projetos de P&D de riscos preferidos e requer a estimação de dois parâmetros: o retorno esperado e o coeficiente de Gini, que essencialmente substitui a variância no modelo média-variância, resultando em uma habilidade de seleção superior. Tal modelo permite a determinação de Dominância Estocástica (DE) entre portfólios candidatos.

Outro tipo de aplicações presentes na literatura não considera sinergias, porém os projetos apresentam relações de interdependência, ou seja, a contribuição de alguns projetos é condicionada a outros projetos considerados. As interdependências se refletem em restrições de compartilhamento de recursos, de condição de execução conjunta, de exclusividade mútua, entre outras.

Bradi *et al.* (2001) formularam um modelo de Otimização Multiobjetivo para seleção de projetos interdependentes utilizando a técnica *Goal Programming* e variáveis binárias. A *Goal Programming* caracteriza-se por lidar com múltiplos objetivos através do estabelecimento de um valor alvo a ser atingido por cada um e, em seguida, desvios indesejados em relação ao conjunto de valores-alvo são minimizados em uma função objetivo. A função objetivo pode ser um vetor ou uma soma ponderada, a depender da variante usada. Os objetivos abordados no modelo são: benefício, custo, risco e preferências. As restrições presentes se referem ao tempo para término requerido, tempo para treinamento requerido, mão-de-obra adicional necessária, dependência de projetos, projetos mutuamente exclusivos e projetos mandatários.

Uma abordagem de Otimização Multiobjetivo alternativa é apresentada por Coffin e Taylor III (1996). Esta abordagem faz uso da lógica *fuzzy* com padrão de busca *beam search* para estimar uma única função objetivo que reflita os múltiplos objetivos envolvidos no problema de seleção de projetos interdependentes de P&D. Os objetivos incluem alguns dos tradicionalmente considerados, como o retorno esperado, e acrescenta o cronograma do

projeto, que é abordado por meio de uma heurística. A função objetivo global é construída somando-se os graus de associação individuais dos vários objetivos para um portfólio de projetos. Através da maximização da função objetivo global seleciona-se o portfólio de P&D que melhor atinge os objetivos do problema.

A lógica *fuzzy* permite incorporar a incerteza nas variáveis de decisão. Os conjuntos usados na lógica *fuzzy* são chamados conjuntos *fuzzy*, pois os valores das variáveis que eles representam não são valores definidos, em vez disso, as variáveis são representadas por uma função de associação, a qual relaciona vários possíveis valores a um grau de associação. A função de associação pode comportar-se de forma linear, não-linear ou discreta, o que melhor reflete o objetivo. Uma condição imposta no modelo considerado é que os graus de associação variem de zero a um, para que um conjunto *fuzzy* normalizado seja considerado.

O espaço de soluções para o problema de seleção de projetos pode ser visualizado como uma árvore de busca, com cada combinação de projetos potencial designada como um nodo. *Beam search* é um procedimento de enumeração implícita derivado da pesquisa em Inteligência Artificial (AI, do inglês *Artificial Intelligence*) que utiliza as restrições do problema e uma função objetivo única para gerar soluções ótimas ou próximas da otimalidade. A técnica explora apenas os melhores caminhos de uma árvore de busca, através da avaliação dos nodos de cada nível de acordo com uma função de avaliação que captura os objetivos do problema, mantendo os nodos de melhor *performance* em relação à função de avaliação. O procedimento cria então o próximo nível da árvore apenas com os nodos mantidos e continua o processo de determinação dos melhores caminhos da árvore. A utilização dos melhores nodos em cada nível como base para continuar a pesquisa permite que o número de caminhos pesquisados seja administrável, além de melhorar a eficiência computacional da técnica de pesquisa.

Ghasemzadeh *et al.* (1999) aborda um modelo baseado em Programação Linear Binária para selecionar e programar um conjunto de projetos ótimo, considerando os objetivos organizacionais e restrições, como limitações de recursos e outras interdependências entre projetos. O uso de variáveis binárias se justifica pela natureza discreta “seleciona ou não” do problema. Este modelo é composto por duas fases. A primeira fase se destina a integrar múltiplos objetivos em uma única função objetivo, que representa o valor relativo de cada projeto e serve como *input* para a segunda fase. A segunda fase consiste na aplicação do modelo de otimização, utilizando as avaliações obtidas na fase anterior como função objetivo. No caso em que se deseja maximizar apenas um objetivo quantitativo não é necessário obter

*scores* para os projetos, utilizando-se em seu lugar a avaliação do projeto para este critério, o que elimina a primeira fase do processo, resumindo o problema a uma otimização monocritério.

A metodologia *Rubust Portfolio Modeling* (RPM) desenvolvida por Liesiö *et al.* (2006) é uma extensão dos métodos de *Preference Programming* para problemas de seleção de portfólio em que um subconjunto de propostas de projetos é escolhido com base em avaliação de múltiplos critérios. Os métodos de *Preference Programming* tratam informações incompletas por meio da inclusão em conjunto, ou seja, o verdadeiro valor do parâmetro deve estar contido em um conjunto de possibilidades caracterizado pelas declarações de preferências do decisor (MARMÓL *et al.*, 1998; DIAS e CLÍMACO, 2000). Na RPM os valores dos projetos individuais, assim como os conjuntos de projetos, são modelados por um modelo aditivo de pesos, de modo que informações incompletas sobre os pesos dos critérios são capturadas a partir de inequações lineares, enquanto intervalos são usados para modelar a *performance* dos projetos em relação aos diferentes critérios.

A seguir abordaremos o terceiro grupo de trabalhos, onde as sinergias são consideradas. Neste contexto, Golabi *et al.* (1981) estende a Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT) para selecionar portfólios de projetos. O MAUT é utilizado para avaliar os projetos individualmente e, de posse destas avaliações, uma transformação funcional é utilizada para converter a função utilidade de projetos em uma função para agregação ao nível do portfólio. Apesar de considerar sinergias, isto é feito apenas posteriormente à aplicação do método, durante reuniões do comitê de seleção.

A Programação Linear é utilizada em Hall *et al.* (1992) para maximizar o *score* técnico total dos projetos considerados para compor o portfólio de projetos do Instituto Nacional do Câncer dos Estados Unidos. As sinergias são abordadas através de restrições usadas para atingir requisitos de sinergia necessários ao portfólio: (1) diversidade da prevalência de fumantes entre os estados, (2) diversidade no declínio da taxa de fumantes e (3) diversidade de áreas geográficas.

Doerner *et al.* (2006) aplicam o método iterativo de Colônia de Formigas de Pareto (P-ACO) para selecionar um portfólio ótimo considerando sinergias. O procedimento consiste em duas fases: identificação do espaço de soluções de todos os portfólios eficientes (isto é, ótimos de Pareto) e exploração interativa desse espaço. O valor do benefício do portfólio é computado como a soma dos valores de benefício individual dos projetos ajustada por potenciais efeitos de sinergia positivas ou de canibalismo (como são chamadas as sinergias

negativas). Acredita-se que P-ACO tem apresentado uma *performance* particularmente boa para esta classe de problemas, em contraste com as meta-heurísticas que em geral apresentam um compromisso entre esforço computacional necessário e qualidade de um espaço de soluções aproximado. A abordagem P-ACO é suportada por um procedimento de pré-processo baseado em Programação Linear Inteira que identifica vários portfólios eficientes em poucos segundos e inicializa a trilha de feromônio antes de executar o P-ACO. Tal extensão permite uma ampla exploração do espaço de busca no começo da pesquisa.

Ainda no contexto de consideração de sinergias, Archer & Ghasemzadeh (1999) propõem que uma estrutura integrada seja utilizada para conduzir efetivamente a seleção de portfólio. Esta estrutura deve decompor o processo em uma série de atividades lógicas flexíveis, envolvendo plena participação do comitê de seleção de portfólio de uma organização. Os autores sugerem que esta abordagem pode usufruir das melhores características de uma combinação de métodos existentes, se bem fundamentada na teoria. Consiste em uma série de estágios que permitem aos decisores caminhar em direção a uma consideração dos projetos que devem ser selecionados.

### 2.2.2 Políticas em Energia Sustentável

Independentemente da perspectiva, o desenvolvimento da qualidade de vida implica um aumento no consumo de energia. Este aumento deve ser válido se entre as metas dos países está atender os pré-requisitos de energia relacionados com o crescimento da população, redução da pobreza ou aumento do ritmo de crescimento econômico. Além disso, este crescimento não pode ser desestruturado. O manejo inadequado dos recursos naturais gera riscos inerentes à proteção do equilíbrio ambiental, o que compromete as perspectivas das gerações futuras. Portanto, o desafio não é comprometer mais recursos para atender às exigências de energia, mas escolher as opções compatíveis com o desenvolvimento sustentável e custos competitivos.

O uso de energia só é considerado sustentável se a disponibilidade suficiente e permanente dos recursos energéticos adequados é assegurada e, ao mesmo tempo, os efeitos prejudiciais do fornecimento, transporte e utilização de energia são limitados (BMU, 2009). Existem grandes reivindicações por mudanças nos sistemas de energia em todo o mundo, a fim de atender aos requisitos de sustentabilidade. O desafio mais urgente é encontrar maneiras de expandir os serviços de energia, especialmente para as populações que ainda dependem de formas tradicionais de energia, embora esta expansão deva ser realizada de maneira segura,



acessível, prática, confiável, justa e ambientalmente saudável (JOHANSSON & GOLDEMBERG, 2002).

A energia limpa oferece uma boa relação custo-benefício para atender a demanda crescente das nações por eletricidade, enquanto reduz as emissões de poluentes atmosféricos e gases de efeito estufa, reduzindo os custos de energia e melhorando a confiabilidade e a segurança do sistema de energia (EPA, 2006). Assim, a inclusão de fontes renováveis apropriadas na matriz energética pode representar um avanço significativo no sentido da sustentabilidade.

Políticas são cursos de ação, gerando consequências mais ou menos preferidas. Decisões políticas são tomadas a fim de implementar programas para alcançar determinados objetivos sociais, econômicos ou ambientais. No setor de energia essas decisões estão intimamente relacionadas com o uso da tecnologia, tributação, esquemas de concessões e regulação, e seu foco depende do contexto considerado. Por exemplo, as organizações internacionais estão preocupadas com a elaboração de tratados para regulamentar o uso de fontes de energia e os níveis de poluição gerada. Por outro lado, os países estão principalmente concentrados em decisões relacionadas com a gestão dos seus próprios sistemas de suprimento de energia.

#### 2.2.2.1 Contexto Global

O fato de que a sustentabilidade tem estado em evidência gera tendências políticas internacionais que são transmitidas para os níveis locais em uma reação em cadeia. Neste contexto, o Protocolo de Kyoto (UNITED NATIONS, 1998) foi eficaz ao se distinguir de convenções que só incentivam os países a reduzir suas emissões de carbono, comprometendo-os a fazê-lo. Adotado em 1997, o Protocolo de Kyoto tentou limitar a emissão de gases do efeito estufa (GEE) através da adoção de reduções obrigatórias nas emissões dos países desenvolvidos. Apesar de inicialmente não ter sido ratificado por todos os países envolvidos, o protocolo gera pressão internacional para que isso aconteça, além de estimular os países em desenvolvimento a controlar suas emissões. Pouco antes de terminar o primeiro período de compromisso em 2012 é improvável que o Protocolo de Kyoto cumpra os seus objetivos, mas certamente deixa espaço para negociação e ratificação das necessidades internacionais.

Estratégias energéticas sustentáveis envolvem desenvolvimento tecnológico e uma mudança crítica de paradigma que vai além do sistema de energia, impactando diretamente sobre o meio ambiente e a sociedade. Objetivos e perspectivas precisam ser moldados para

inserir o aspecto sustentável da equação através de um processo gradual e sujeito a inúmeras dificuldades. Müller-Steinhagen & Nitsch (2005) identificaram que, assumindo que a oferta de energia atual seja medida com base nas diretrizes de sustentabilidade, os maiores *déficits* podem ser descritos como: (1) o consumo excessivo dos recursos energéticos finitos, (2) as mudanças iminentes no clima global; (3) as diferenças exorbitantes no consumo de energia entre os países industrializados e os países em desenvolvimento; (4) os riscos associados com o uso extensivo da energia nuclear.

A transição para sistemas energéticos sustentáveis deve ser realizada de forma que os resultados permaneçam no longo prazo. Para que isto ocorra, os instrumentos políticos devem ser concebidos para estimular o progresso tecnológico e para apoiar e estabelecer práticas sustentáveis. Efeitos relacionados com essas políticas, portanto, devem ser examinados não apenas à luz de considerações econômicas de curto prazo (isto é, eficiência estática), mas também em termos de impactos de longo prazo (ou seja, a eficiência dinâmica). Uma das vantagens de melhorar a eficiência dinâmica é o impacto dos instrumentos políticos sobre a capacidade do sistema energético assegurar uma transição em longo prazo para um caminho tecnológico mais limpo e eficiente, ambientalmente compatível e de baixo custo (RAFAJ *et al.*, 2006).

Políticas energéticas não são construídas de forma isolada. Devem estar alinhadas com estratégias mais amplas, em consonância com os aspectos sociais, econômicos e ambientais. Além disso, hoje em dia a formulação de políticas em energia sustentável é dirigida por metas e prioridades, considerando o impacto de características específicas de cada país (PATLITZIANAS *et al.*, 2008). Na verdade, o contexto energético do país, sua evolução, potencial e limitações devem ser considerados.

A política é hoje o principal impulsionador do crescimento da energia renovável. Tal crescimento é mais forte onde os formuladores de políticas (*policy makers*) criaram condições favoráveis. Atualmente existe um rico conjunto de experiências políticas implantadas em contextos nacionais e locais.

Na década de 1980 e início da década de 1990 alguns países já implantavam políticas para promover as energias renováveis. Contudo, apenas a partir de 1998 é que este movimento se intensificou, especialmente no período entre 2005 e 2010, quando o número de países com algum tipo de meta política relacionada a energias renováveis praticamente duplicou, passando de 55 no início de 2005 para 118 no início de 2011 (REN21, 2011).

As políticas que promovem energias renováveis facilitam o crescimento constante e sustentável do mercado de energia renovável. Cada política possibilita reduzir uma ou mais barreiras que impedem o desenvolvimento das energias renováveis, tais como as barreiras relacionadas ao custo e aos riscos percebidos em aspectos técnicos, financeiros e jurídicos. Além disso, a cada ano as sinergias entre políticas que promovem as energias renováveis e aquelas que promovem a melhoria da eficiência energética se tornam mais claras (ACEEE, 2007).

Políticas respondem a realidades nacionais e locais específicas. Portanto não há um único tipo de política que se encaixe em todos os contextos. Os governos têm um número de opções diferentes de instrumentos políticos que podem ser usados para promover as energias renováveis (IPCC, 2001). Muitas vezes, uma combinação de instrumentos é a chave para o sucesso.

A “Renewable Energy Policy Network for the 21st Century” (REN21) é uma rede política que proporciona um fórum para lideranças internacionais em política de energias renováveis, a fim de compartilhar conhecimentos e facilitar o rápido crescimento das tecnologias de energias renováveis nos países em desenvolvimento e economias industrializadas. REN21 (2011) categoriza os instrumentos políticos de suporte direto em três grupos distintos: (1) Investimento Público; (2) Políticas Fiscais; e (3) Políticas Regulatórias.

A disponibilidade de financiamento para o desenvolvimento de energias renováveis é essencial para o contínuo crescimento dessas tecnologias. Dois principais métodos de investimento público são as maneiras pelas quais os governos auxiliam na alocação do capital necessário para o setor das energias renováveis. Um auxilia na distribuição do financiamento para a implementação, enquanto o outro é um meio de celebração de contratos. O apoio financeiro dos governos nacionais e sub-nacionais ajuda a financiar o desenvolvimento de infra-estrutura e fechamento de contratos para construção e operação, bem como para quantidades fixas de capacidade renovável. Estratégias de financiamento público têm sido implementadas em muitos países e podem ser usadas para o desenvolvimento de uma grande variedade de diferentes tecnologias em energia renovável.

A categoria de políticas fiscais é constituída de políticas que estão focadas em redução de custos e melhoria da competitividade relativa das tecnologias de energia renovável em determinados mercados. Fazem parte desta categoria: a concessão de capital, financiamento de terceiros, créditos fiscais por investimento, isenção de impostos sobre propriedade, crédito de imposto sobre a produção, desconto de impostos sobre vendas, isenção de impostos

especiais de consumo, entre outros. Algumas destas medidas pode ser bem aplicadas aos investimentos em tecnologias de energia renovável realizados pelos próprios usuários. Impostos sobre os combustíveis fósseis também melhoram a posição competitiva da energia renovável e são particularmente apropriados para internalizar efeitos negativos externos sobre a segurança energética e ambiental.

Estabelecer a estrutura regulatória é tão importante quanto fornecer os subsídios para as energias renováveis. Dois principais tipos de políticas regulatórias têm sido utilizados para incorporar as energias renováveis em uma matriz energética. Um garante preço, o outro garante a parcela de mercado através de metas e quotas estabelecidas pelo governo. Eles são aplicados com o intuito de designar um papel significativo para a energia renovável na geração de eletricidade e nos mercados de combustíveis e transportes. Em mercados parcialmente segregados licitações competitivas para concessão de energia renovável ou certificados comercializáveis de energia renovável também constituem políticas mandatárias de mercado. Em alguns casos (por exemplo, áreas fora da rede elétrica onde anteriormente não existir mercado) a política deve realmente organizar os mercados e o desenvolvimento institucional necessário. Alguns dos principais instrumentos políticos regulatórios são: tarifa-prêmio, obrigação de quota de renováveis (RPS) e os Certificados Comercializáveis de Energia Renovável.

Nos níveis nacional e local as políticas têm desempenhado um papel importante na condução de mercados de energia renovável, investimentos e desenvolvimentos da indústria. No entanto, nem todas as políticas são igualmente eficazes no apoio a estes desenvolvimentos. O sucesso desses esforços depende não só da escolha política, mas também na concepção e implementação de políticas (IPCC, 2011). Conseqüentemente, os governos continuam a atualizar e rever políticas em resposta aos desafios de criação e implementação e em resposta aos avanços nas tecnologias e mudanças no mercado.

A seguir é feita uma breve contextualização acerca da matriz energética brasileira e em seguida são apresentadas as principais políticas voltadas para a promoção da sustentabilidade energética no país.

#### 2.2.2.2 Contexto Nacional

De acordo com a IAEA (2006) a geração de eletricidade no Brasil cresceu a uma taxa média anual de 4,2% entre 1980 e 2002. A Hidroeletricidade continua sendo a tecnologia predominante de geração, seguida pelas próximas mais significativas – nuclear, gás natural e

óleo diesel - nenhuma com participação maior do que 6%. Entre 1980 e 1995, a participação da hidroeletricidade permaneceu constante em 92%. Com a introdução da biomassa, energia nuclear e gás natural, sua participação foi reduzida para 83% em 2002. O Balanço Energético Nacional 2010 (EPE, 2010) mostra que no ano de 2009 o fornecimento de eletricidade doméstica por usinas hidrelétricas nacional foi de cerca de 76,9%. Adicionando as importações de eletricidade, que também vêm essencialmente de fontes renováveis, pode-se afirmar que quase 85% do fornecimento de eletricidade no Brasil é proveniente de fontes renováveis – isso sem considerar a parcela da geração térmica que utiliza a biomassa (5,4%) e a geração de energia eólica incipiente, que representa apenas 0,2%.

Ao longo da década de 90, o setor energético brasileiro, especialmente o sistema elétrico, passou por sucessivas reformas impulsionadas principalmente pelas seguintes forças motrizes: (1) o desenvolvimento de um mercado competitivo em alguns setores, (2) a garantia de expansão do sistema, para que pudesse acompanhar o crescimento do país, (3) a expansão do uso do gás natural na matriz energética brasileira, (4) o estímulo aos serviços de energia universal, (5) a garantia da qualidade dos serviços de energia, (6) o aumento da eficiência e qualidade na prestação de serviços de energia (MME e EPE, 2007).

A reestruturação do setor elétrico criou as agências reguladoras, as políticas de regulamentação com ênfase no livre acesso às redes de transporte e promoveu a abertura do setor para novas empresas, estimulando a separação e privatização das empresas de distribuição.

De acordo com dados do Banco de Informações de Geração (ANEEL, 2011), a capacidade instalada do Sistema Elétrico Brasileiro em junho de 2011 é de aproximadamente 114.545 MW, considerando-se apenas projetos de geração constantes do Sistema Interligado Nacional (SIN), incluindo a parcela de Itaipu importada do Paraguai, como mostrado na Tabela 2.1.

Dado o cenário atual, o Brasil tem um número de caminhos diferentes a seguir. O mais óbvio parece ser o inercial, ou seja, usar o potencial já explorado das hidrelétricas, permitir a expansão da bioenergia (especialmente etanol), completar o programa nuclear e continuar dependendo de petróleo (GOLDEMBERG & MOREIRA, 2005). No entanto, a adoção desta estratégia irá provavelmente adiar decisões de expansão necessária, enquanto as reservas de energia continuarão a ser consumidas, além de descartar as possibilidades de exploração e desenvolvimento de novas tecnologias. A diversificação das fontes de energia, principalmente

através da inclusão das energias renováveis poderia aumentar a duração das reservas de energia e contribuir para um desenvolvimento sustentável.

Tabela 2.2 – Capacidade instalada do SIN

Fonte	MW	Participação (%)
Hidro <sup>a</sup>	81.602	66,5
Termal	21.789	17,8
Nuclear	2.007	1,6
Fontes Alternativas	9.147	7,5
Capacidade Instalada	114.545	93,3
Importações contratadas <sup>b</sup>	8.170	6,7
Capacidade total com importações	122.715	100

Legenda: (a) Inclui a parcela brasileira de Itaipu; (b) Importação de Itaipu da energia não consumida pelo Sistema Elétrico Paraguaio.

Fonte: ANEEL, 2011

#### 2.2.2.2.1 Principais Políticas em Energia Renovável

Certamente o fato de o Brasil ser um país com amplos recursos hídricos contribuiu para que sua matriz energética se consolidasse como uma matriz predominantemente renovável. Porém, ainda assim foi necessário ao país desenvolver programas para acompanhar a evolução do cenário energético mundial. A IEA (2011b) considera alguns principais programas políticos adotados no país com o foco voltado para a eficiência energética e energia renovável. Estes programas serão descritos a seguir.

O primeiro programa adotado no país com o intuito de buscar uma maior eficiência energética foi o *Programa Nacional de Conservação de Energia* (PROCEL), criado em dezembro de 1985 pelos Ministérios de Minas e Energia e da Indústria e Comércio, e gerido por uma Secretaria-Executiva subordinada à Eletrobras. Em 18 de julho de 1991, o PROCEL foi transformado em programa de governo, tendo sua abrangência e suas responsabilidades ampliadas. O PROCEL financiou uma série de programas de eficiência elétrica, com foco na gestão da demanda através da educação, rotulagem e padrões de eficiência obrigatórios, entre outras medidas. O alvo inicial do PROCEL era reduzir o consumo de eletricidade e perdas do lado da oferta de aproximadamente 8,4. TWh/ano até 2003, equivalente a 2,5% do consumo de energia do Brasil à época. Constituiu-se em um programa multisetorial cujas medidas são baseadas em educação e divulgação, padronização e instrumentos regulatórios (ELETROBRAS, 2011).

Em 1991 o *Programa Nacional para o Uso Energético Eficiente do Petróleo e Derivados do Gás Natural* (CONPET) foi desenvolvido pelo Ministério de Minas e Energia e coordenado por diversos órgãos federais e representantes da iniciativa privada. Consiste em um programa multisetorial para melhorar a eficiência energética do petróleo e derivados de gás natural, e inclui vários projetos: a iniciativa de Gás Natural Veicular; o Programa Brasileiro de Etiquetagem de Eletrodomésticos e de Etiquetagem Veicular; o Programa Petrobras, além de ações integradas. O CONPET foi concebido para promover o uso eficiente destas fontes de energia não renováveis no transporte, nas residências, no comércio, na indústria e nos setores agrícola e pecuária. Dependente da Petrobras, o programa estabeleceu associações de cooperação técnica e parcerias com órgãos governamentais, ONGs e representantes de entidades ligadas ao tema (MME, 2011).

Desde 1998 a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) impôs obrigações para as companhias de distribuição de energia elétrica para fazer investimentos que reduzam o desperdício elétrico, inclusive através de medidas de eficiência energética. Desde 2005, um mínimo de 50% desses investimentos devem ser alocados a programas de eficiência energética de baixo rendimento. Para cumprir esta obrigação as empresas devem apresentar projetos à ANEEL. Orientações para a preparação dos programas foram estabelecidas pela ANEEL em 2000, bem como resoluções específicas. Projetos e programas estão incluídos no Programa Anual contra o desperdício de Energia Elétrica das companhias. O programa deve estabelecer metas, em termos de ações tomadas como bem como investimentos financeiros, em conformidade com as orientações. Além disso, desde 2007 a ANEEL exige que planos de avaliação sejam fornecidos para os programas entregues. Nos períodos de 2005 a 2006 e 2006 a 2007, programas de baixo rendimento corresponderam a mais de 50% dos investimentos das companhias em programas de eficiência energética, totalizando 63% e 66% dos investimentos, respectivamente. Investimentos das companhias totalizaram USD 130 milhões em 2005-2006 e USD 80 milhões em 2006-2007. Programas nas indústrias somaram 15% e 6% respectivamente, enquanto que outros programas representaram 22% e 28% (ANEEL, 2011).

Em julho de 1999, o então presidente Fernando Henrique Cardoso criou a *Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima* (CIMGC), composta por representantes de 10 ministérios diferentes e do Gabinete da Casa Civil da Presidência da República, com a finalidade de coordenar as ações do governo na área de mudanças climáticas. De acordo com o Decreto de fundação, a nova entidade deveria ser co-presidida pelo Ministério da Ciência e

Tecnologia (MCT) e pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA). Além disso, estabeleceu uma equipe do MCT como a Autoridade Nacional Designada (AND) do Brasil e coordenador executivo das políticas climáticas em geral. Isto alterou o centro da formulação de políticas em relação ao aquecimento global. De modo mais geral, a principal responsabilidade da CIMGC foi formular diretrizes para uma política nacional em matéria de mudanças climáticas e prover inputs para as posições do Governo no processo da *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC). Desde o início de 2006, isso ocorreu no âmbito de dois programas: *Ciência, Tecnologia e Inovação para a Natureza e o Clima* e *Gestão Política da Ciência, Tecnologia e Inovação*. A CIMGC também tratou de assuntos relativos ao Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). O decreto de fundação requer que a CIMGC coordene as ações com entidades representativas da sociedade civil e incentive a participação de grupos públicos e privados e especialistas (MTC, 2011).

Em agosto de 2002 o Brasil participou da criação da Parceria em Energia Renovável e Eficiência Energética (*Renewable Energy & Energy Efficiency Partnership* – REEEP), concebida na Cúpula Mundial sobre Desenvolvimento Sustentável (*World Summit on Sustainable Development*). Consiste em uma parceria público-privada global que estrutura iniciativas políticas e regulatórias em energia limpa, e facilita financiamento para projetos de energia (IEA, 2011b).

A REEEP é apoiada pelos governos nacionais, empresas, bancos de desenvolvimento e Organizações Não Governamentais. É uma entidade jurídica com sede na Áustria e com o estatuto de uma ONG internacional. O Secretariado Internacional tem sede em Viena, juntamente com os escritórios do Programa de Desenvolvimento Industrial das Nações Unidas (*United Nations Industrial Development Programme* – UNIDO).

A parceria promove oportunidades de investimento, suporta modelos de negócios e institucionais, une pequenos projetos para que atinjam uma proporção financiável e replica mecanismos de financiamento bem sucedido. O objetivo é garantir que estruturas políticas e regulatórias incentivem a integração de energias limpas, promovam o uso eficiente de energia e atraiam investimentos para o setor. A REEEP realiza ciclos regulares de financiamento de programas, com foco em projetos que podem ser replicados e ampliados, e têm um impacto sobre o desenvolvimento do mercado para renováveis, eficiência energética e inovação. A parceria tem mais de uma centena de projetos em seu portfólio, projetado para ajudar a eliminar barreiras de mercado relativas à energia limpa em mais de quarenta países, principalmente nos países em desenvolvimento (REEEP, 2011).



No Brasil, esta parceria em contato com o governo através do MME realizou diversos projetos, tais como: Energia da Amazônia, projeto de auxílio à adoção do biogás nas cidades brasileiras para o saneamento e energia, projeto de financiamento para o aquecimento solar de água, entre outros. Alguns projetos dessa parceria estão em andamento, entre eles o projeto para o desenvolvimento do mercado de aquecimento solar de água e o projeto para estruturação da legislação em energia eólica no Brasil (REEEP, 2011).

Em 2004 foi instituído o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), com o objetivo de aumentar a participação da energia elétrica produzida por empreendimentos concebidos com base nas fontes eólica, biomassa e pequenas centrais hidrelétricas (PCH) no Sistema Elétrico Interligado Nacional (SIN). O intuito do programa é promover a diversificação da Matriz Energética Brasileira, buscando alternativas para aumentar a segurança no abastecimento de energia elétrica, além de permitir a valorização das características e potencialidades regionais e locais.

Coube ao Ministério de Minas e Energia (MME), definir as diretrizes, elaborar o planejamento do Programa e definir o valor econômico de cada fonte e às Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (Eletrobras), o papel de agente executora, com a celebração de Contratos de Compra e Venda de Energia (CCVE). Para tanto, foi estabelecido que o valor pago pela energia elétrica adquirida, além dos custos administrativos, financeiros e encargos tributários incorridos pela Eletrobrás na contratação desses empreendimentos fossem rateados entre todas as classes de consumidores finais atendidas pelo SIN, com exceção dos consumidores classificados na Subclasse Residencial Baixa Renda (consumo igual ou inferior a 80 kWh/mês).

O PROINFA abrange a implantação de 144 usinas, totalizando 3.299,40 MW de capacidade instalada, sendo 1.191,24 MW provenientes de 63 PCHs, 1.422,92 MW de 54 usinas eólicas, e 685,24 MW de 27 usinas a base de biomassa. Toda essa energia tem garantia de contratação por 20 anos pela Eletrobras. É um programa pioneiro, que impulsionou essas fontes, mas em especial a energia eólica. O Brasil passou, em pouco mais de três anos, de apenas cerca de 20 MW de energia eólica instalada, para os atuais 414 MW instalados, e, em breve, serão completados os demais MW previstos (MME, 2011). E isso se deve, em grande parte, ao PROINFA, que reafirmou a vocação brasileira de uma matriz elétrica limpa.

O grande desafio estabelecido pelo PROINFA foi o índice de 60% de nacionalização dos empreendimentos, que teve o objetivo principal de fomentar a indústria de base dessas fontes. Se considerarmos como fator de desenvolvimento o domínio da cadeia produtiva, o

PROINFA coaduna com outras ações do governo que resultaram no fortalecimento da indústria brasileira de geração de energia elétrica.

Ainda em 2004, o Governo Federal implantou um novo marco regulatório para o setor de energia. Este conjunto de regras tinha como principais objetivos estabelecer regras claras para a indústria de energia elétrica, garantir as tarifas mais baixas possíveis para o consumidor e assegurar abastecimento de energia para evitar racionamentos. Para que estes objetivos fossem atingidos, alterou-se a forma da compra da energia das geradoras pelas distribuidoras, o mecanismo de repasse do custo desta energia para as tarifas e as regras para licitação de novas usinas (MME, 2003).

Sob a estrutura do novo modelo regulatório, a maioria dos novos projetos de energia participam de leilões para acordos de compra de energia a longo prazo (Power Purchase Agreements - PPAs), organizados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Distribuidoras de energia são obrigadas a entrar em contratos de longo prazo para toda a sua demanda de eletricidade através de um sistema de leilão reverso. Sob o sistema de leilões, estão leilões específicos para fontes de energia existente e aqueles para novas fontes de energia, incluindo as energias renováveis. A ANEEL também realiza leilões de reserva de energia, projetados para a compra de fornecimento de energia adicional para o Sistema Integrado Nacional (SIN), a fim de reduzir os custos operacionais do sistema.

Dentre os novos leilões e os leilões de reserva de energia, alguns são direcionados a fontes de energia específicas. Em 2008, o Brasil realizou o seu primeiro leilão apenas de biomassa para energia de reserva. O governo leiloou 2.379 MW de energia de 31 plantas termelétricas que utilizam cana-de-açúcar e capim elefante como fonte de energia. A energia leiloadada deveria ser fornecida em 2009 e 2010, com contratos de compra de energia prorrogáveis por 15 anos. O preço médio final foi de R\$ 58,84/MWh (IEA, 2011b).

Em dezembro de 2009, o Brasil realizou seu primeiro leilão de reserva apenas de energia eólica. O leilão permite que os produtores de energia eólica vendam a energia excedente para os distribuidores de energia e os compradores industriais, e também se destina a fornecer um incentivo aos produtores para aumentar a produção de energia. O governo leiloou 1.805 MW de potência de 71 projetos, selecionados dos 339 projetos apresentados, totalizando 10.055 MW de potência. Os contratos de compra de energia devem começar em 01 de julho 2012 e duram 20 anos. O preço médio final foi de R\$ 85/MWh (IEA, 2011b).

Em dezembro de 2008 o presidente do Brasil assinou o Plano Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC). O Plano em grande parte concentra-se em reduzir as emissões de gases do

efeito estufa originários do desmatamento, abrangendo metas de redução de desmatamento e estabelece mecanismos de financiamento e incentivos para alcançar o objectivo de reduzir o desmatamento na Amazônia pela metade até 2017.

O PNMC também contém disposições relativas à eficiência energética e energias renováveis. Destina-se a aumentar a eficiência energética em vários setores da economia em linha com as melhores práticas e para manter o alto *mix* de energias renováveis nos setores elétrico e de transportes brasileiros. Em eficiência energética, um plano de ação nacional é previsto, que terá como objetivo reduzir o consumo de eletricidade em 10% até 2030. A substituição de refrigeradores antigos, um milhão por ano em 10 anos, também é destacada. O Plano também visa reduzir as perdas não-técnicas na distribuição de energia elétrica a uma taxa de 1.000 GWh por ano durante os próximos dez anos. Melhorias de eficiência energética na indústria, transportes e construção são também defendidas neste plano (CASA CIVIL DA PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA, 2008).

#### 2.2.2.2.2 Plano para Expansão de Energia 2010-2019

Em dezembro de 2010, o Ministério de Minas e Energia aprovou o novo Plano Decenal 2010-2019 para Expansão de Energia. Esse plano implementa a eliminação progressiva de usinas para geração de energia através de combustíveis fósseis e prevê grandes expansões nos setores conectados à rede de energia hidroelétrica e eólica nos próximos dez anos.

Metas de capacidade instalada para as energias renováveis foram fixadas como segue (MME/EPE, 2010):

- Hidrelétrica: de 83,1 GW em 2010 para 116,7 GW em 2019;
- Pequenas centrais hidrelétricas: de 4 GW em 2010 para 7GW em 2019;
- Biomassa: de 5,4 GW em 2010 para 8,5 GW em 2019;
- Eólica: 1,4 GW em 2010 para 6 GW em 2019.

O plano decenal prevê um pacote de investimentos de R\$ 952 bilhões, equivalente a EUR 420,2 bilhões, e visa geração adicional da rede conectada a partir de fontes renováveis de 4GW até o final de 2010, 777 MW em 2011 e 2 GW em 2012. Considerando o aumento dramático no consumo doméstico de eletricidade, 52% até 2019, a participação total de fontes renováveis de energia terá que aumentar em 13% anualmente, com eólica, biomassa e hídrica como *front-runners*.

### 2.2.2.2.3 O Plano Nacional de Energia 2030

O ciclo de planejamento é um processo necessariamente recursivo, que se retroalimenta. Vale à pena, inicialmente, fazer um corte nesse processo de tal forma que permita a sua compreensão adequada. Assim, pode-se afirmar que a partir da definição de políticas e diretrizes são desenvolvidos estudos e pesquisas que efetivamente vão orientar o desenvolvimento do setor de energia. Este conjunto de estudos e pesquisas quando sistematizados e continuados compõem o ciclo de planejamento energético integrado.

O Plano Nacional de Energia 2030 (MME e EPE, 2007) estima um crescimento da população de 185,4 milhões de habitantes em 2005 para 238,5 milhões em 2030, assumindo um crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) em cerca de 4,1%, o que resultaria em um consumo total de eletricidade em 2030, de 1.083,4 TWh, gerando uma necessidade de expansão de 4% ao ano desde 2005. Deve-se notar que a estratégia para atender a essa demanda inclui iniciativas de eficiência energética (em adição ao progresso autônomo intrinsecamente considerado nas projeções), que poderia fornecer uma parcela, de aproximadamente 5% desta demanda. Assim, a exigência de produção seria 1.030,1 TWh.

O Brasil tem fontes primárias para produzir eletricidade em quantidade suficiente para abastecer o mercado no horizonte além de 2030. Na verdade, apenas considerando a disponibilidade de recursos e reservas de energia no país, o mercado pode ser servido no horizonte fornecido pelo plano. No entanto, questões como a competitividade entre as fontes, a diversidade, as restrições sociais e ambientais e a racionalização do uso de energia levam a um portfólio de alternativas múltiplas para a estratégia de expansão.

De acordo com MME e EPE (2007), as principais ações contempladas no Plano Nacional de Energia para 2030 são:

- Expansão da capacidade hidrelétrica em 164GW;
- Expansão da capacidade termelétrica em 48GW;
- Expansão do uso de fontes alternativas para atender aos 13GW de capacidade adicional necessária;
- Integração energética internacional;
- Melhoria da transmissão (integração das usinas hidrelétricas do SIN);
- Medidas para aumentar eficiência energética;
- Redução das emissões de gases do efeito estufa;
- Inserção de novas tecnologias para o transporte de energia.

No que diz respeito à geração de eletricidade, as novas fontes renováveis (por exemplo, biomassa, eólica, pequenas centrais hidrelétricas) são ainda consideradas caras, dado o preço da energia nos leilões de aquisição promovidos pelo Governo Federal. A energia elétrica das usinas hidrelétricas de Santo Antonio e Jiraú no Rio Madeira, atingiu um valor inferior a USD 46/MWh, considerando as taxas de câmbio de 2009, enquanto a energia das usinas a biomassa foi contratada por uma receita fixa de USD 90/MWh e geradores eólicos exigiram mais de US \$ 115/MWh. Segundo este modelo, ganham as propostas dos empresários que oferecerem uma energia a um custo menor quando a planta começa a operar, independentemente da qualidade. Aparentemente este é um bom sistema porque favorece os consumidores, mas tem o resultado perverso que favorece também as usinas que podem ser construídas rapidamente, mesmo que sejam mais poluentes (LUCON & GOLDEMBERG, 2009).

### 2.2.3 Modelos de Decisão em Energia Sustentável

A aplicação dos modelos e métodos de Pesquisa Operacional tem revelado uma contribuição muito eficaz para a resolução e apoio à decisão em vários problemas que surgem no setor de energia desde o estabelecimento da Pesquisa Operacional como área de estudo.

O setor de energia é caracterizado por uma diversidade de problemas de natureza distinta (técnicos e operacionais, construção de políticas, planejamento de curto e longo prazo, gerenciamento de sistemas, modelagem de mercado, entre outros), e pelas diversas partes envolvidas (geradoras, transmissoras, distribuidoras, clientes, operadores do mercado e do sistema, órgãos reguladores, governos, etc.). A Pesquisa Operacional oferece aos pesquisadores e profissionais um conjunto extenso e diverso de modelos e métodos para lidar com esses desafios e problemas de forma criativa e eficaz.

As mudanças em curso na organização do setor de energia, especificamente no setor elétrico, tais como a dissociação das atividades anteriormente verticalmente integradas, a tendência para a liberalização dos mercados da energia, os problemas ambientais associados com as atividades da extração à utilização final da energia, as preocupações sócio-econômicas no âmbito do desenvolvimento sustentável, trazem novos desafios, bem como novas oportunidades para a Pesquisa Operacional (ANTUNES & GOMES, 2009).

A tomada de decisões estratégicas envolvendo desenvolvimento sustentável incorpora desafios decorrentes das múltiplas dimensões da meta de sustentabilidade, da complexidade

dos sistemas sócio-econômicos e biofísicos, da natureza de longo prazo dos problemas e das incertezas associadas.

A aplicação de modelos de decisão em energia sustentável segue uma evolução condizente com a visibilidade do tema. A conscientização ambiental iniciada na década de 80 contribuiu para a modificação das decisões tomadas em sistemas de energia (WANG *et. al.*, 2009; POHEKAR & RAMACHANDRAN, 2004). Inicialmente a abordagem monocritério prevalecia, onde geralmente se deseja obter a solução mais eficiente considerando o custo como restrição. Este foco foi progressivamente modificado, passando a abranger a dimensão ambiental e, após a introdução do conceito de sustentabilidade, as dimensões social, tecnológica, ambiental e econômica passaram a ser tratadas conjuntamente, de forma inter-relacionada. Essa ótica multidimensional torna as ferramentas de MCDA extremamente úteis para lidar com tais objetivos complexos e conflituosos.

No âmbito da energia sustentável, Wang *et. al.* (2009) disponibilizam um amplo levantamento da literatura, relatando os principais métodos utilizados para cada etapa do processo de MCDA: (1) seleção dos critérios, (2) determinação dos pesos, (3) análise multicritério e (4) agregação (no caso onde se tem mais de um decisor). Além disso, fornece uma revisão detalhada acerca dos critérios utilizados neste contexto.

Para seleção dos critérios, os métodos abordados são o Delphi, Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), Desvio Minmax e o Método do Coeficiente de Correlação. No que tange aos métodos de determinação dos pesos, observam que o uso dos pesos iguais é bastante comum na tomada de decisão em energia sustentável, e, quando não utilizado, abre espaço para os métodos baseados em ordenamento (*rank-order weights*) que podem ser divididos em duas categorias: subjetivos e objetivos. Enquadram-se como métodos subjetivos o SMARTS, sua versão aperfeiçoada, o SMARTER, o *Swing weighting*, SIMOS, Comparação par a par e o AHP. Os métodos subjetivos são mais utilizados no tipo de decisão considerado do que os objetivos, principalmente para obter a prioridade de um indicador mantendo outros em um mesmo nível com o intuito de projetar o desempenho em um aspecto. Os métodos objetivos elicitam os pesos dos critérios utilizando dados mensurados e informação, refletindo o grau de diferença. Na categoria dos métodos objetivos estão o Método da Entropia, o *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution Method* (TOPSIS) e o método de combinação de pesos.

Na análise multicritério três categorias de métodos são observadas: os elementares, os métodos de critério único de síntese e os métodos de sobreclassificação. Entre os elementares

pode-se citar a ordenação por dominância, Maxmin, Minmax, o método Lexicográfico e a soma ponderada. Os métodos de critério de síntese encontrados na literatura são o SMARTS, MAUT, MAVT e UTA. Encontra-se em aplicações utilizando sobreclassificação os métodos das famílias ELECTRE e PROMETHEE.

O levantamento de Wang *et al.* (2009) concluiu que o método de critério de síntese mais utilizado é o AHP. Pode-se creditar este fato à presença no processo do AHP de uma etapa inicial de estruturação dos objetivos, extremamente útil para analistas inexperientes. A classificação desenvolvida por estes autores considera também situações em que a lógica *fuzzy* é aplicada combinada a métodos de AMD. Isto ocorre quando não é possível disponibilizar valores exatos de avaliação, devido à indisponibilidade, incerteza ou em decorrência de informações vagas fornecidas pelo decisor.

Pohekar & Ramachandran (2004) desenvolveram uma revisão da aplicação de métodos multicritério em um contexto mais restrito: o de planejamento de energia sustentável. Foram consideradas aplicações em planejamento de projetos de energia, gerenciamento de energia em edificações e transportes, alocação de recursos energéticos, planejamento de companhia de energia e outras áreas relacionadas. Os trabalhos foram classificados por data de publicação antes de 1990 e depois, para destacar a adequação dos métodos às modificações no cenário global. O estudo concluiu que: (1) AHP é o método mais popular para priorizar as alternativas, seguido pelo PROMETHEE e ELECTRE; (2) A Programação Multiobjetivo é também muito utilizada para formular planos alternativos; (3) Métodos de AMD utilizando lógica *fuzzy* são adotados para considerar as incertezas no planejamento energético e (4) Sistemas de apoio à decisão estão se tornando populares em planejamento energético e alocação de recursos devido ao crescente desenvolvimento de recursos computacionais.

Outros levantamentos do uso de métodos multicritério para planejamento de energia sustentável estão presentes na literatura. Hobbs & Meier (1994) compararam os métodos em relação à simplicidade na aplicação, Huang & Poh (1995) discutiram os métodos utilizados na modelagem de energia e meio ambiente sob incertezas e Lahdelma *et al.* (2000) abordaram estes métodos para o gerenciamento e planejamento ambiental.

No contexto de problemas ambientais, Salminen *et al.* (1998) desenvolveram um estudo comparativo em relação à aplicação de quatro métodos à problemática de ordenação: ELECTRE III, PROMETHEE I e II e SMARTS. A comparação foi realizada considerando-se quatro situações: um problema de planejamento do uso de terras, um problema de localização de uma companhia de tratamento de lixo e dois problemas de escolha de um sistema de

gerenciamento de lixo sólido. A análise é feita para três etapas dos métodos: (1) construção dos critérios, (2) construção das relações entre alternativas e (3) procedimento de ordenação. Os autores recomendam a utilização do ELECTRE III, sob a alegação de que os outros métodos comparados não apresentam recursos superiores a este.

#### 2.2.3.1 Seleção de Tecnologia

A seleção das tecnologias para compor uma matriz energética é um problema amplamente discutido na literatura. No entanto, a demanda por sistemas sustentáveis está exigindo formas de incluir a energia renovável, criando uma necessidade de maneiras consistentes de fazê-lo. O problema passa por uma evolução e, conseqüentemente, as formas de resolvê-lo devem ser adaptadas. Novas metas devem ser propostas, alguns critérios devem ser modificados e outros incluídos. Métodos que se encaixam perfeitamente antes podem não detectar certas nuances específicas do novo problema, como a exigência de diversidade, por exemplo.

O problema de seleção de tecnologia trata sobre como escolher a melhor opção do conjunto considerado de tecnologias disponíveis. Tran & Daim (2008) relatam que ferramentas de seleção de tecnologia variam significativamente. A revisão desenvolvida por estes autores indica que diferentes ferramentas são utilizadas no setor governamental em comparação com o setor privado. Segundo Shehabuddeen *et al.* (2006), ferramentas de seleção de tecnologia precisam direcionar decisões melhores e, ao mesmo tempo, aumentar a padronização e rastreabilidade. Um passo importante na seleção de tecnologia consiste em definir as necessidades e os elementos desejáveis. Isto é conhecido como "análise de *gap*" e permite a eliminação rápida de opções inadequadas. No entanto, é importante notar que uma pequena mudança ou uma nova adaptação ao longo do tempo pode afetar significativamente as opções disponíveis.

Daim *et al.* (2009) demonstraram como a análise de *gap* pode ser usada na avaliação de tecnologias limpas para a geração de eletricidade para casos específicos. Cowan e Daim (2009) desenvolveram um roteiro mostrando o crescimento e os padrões de custo de diferentes alternativas de geração de eletricidade. Daim e Cowan (2010) ampliam o trabalho anterior através da construção de um modelo que integra considerações obtidas no relatório do Departamento Americano de Avaliação de Tecnologias (*U.S. Office of Technology Assessment – OTA*) (1995) e descreve como estas considerações podem ser implementadas no caso das energias renováveis usando programação objetivo.



Doukas *et al.* (2007) avaliam tecnologias de energia em termos de sustentabilidade através de uma abordagem de decisão multicritério flexível que utiliza variáveis linguísticas para auxiliar *policy makers* na formulação de prioridades de tecnologias em energia sustentável. Outra abordagem proposta por Evans *et al.* (2009) usa indicadores de sustentabilidade para avaliar tecnologias renováveis de geração elétrica baseadas em não-combustão. Em seguida, as tecnologias de energia renovável foram classificadas para cada indicador, assumindo que os indicadores têm igual importância para o desenvolvimento sustentável.

Shen *et al.* (2011) examinam a correspondência entre fontes de energia renováveis e diferentes objetivos políticos utilizando o método AHP, que permite a hierarquização dos objetivos políticos e de seus critérios associados. O tratamento qualitativo no AHP leva à estimativa numérica da importância relativa de cada critério e alternativa. Através da análise de sensibilidade, a importância relativa dos objetivos traduzida em pesos é ajustada separadamente com o intuito de construir cenários políticos.

Outras aplicações do AHP à energia sustentável são encontradas na literatura (Lee *et al.*, 2007; Chatzimouratidis & Pilavachi, 2008; Chatzimouratidis & Pilavachi, 2009; Akash *et al.*, 1999; Nigim *et al.*, 2004; Kablan, 2004; Jaber *et al.*, 2008).

Tugrul *et al.* (2010) utilizam a programação multiobjetivo *fuzzy* para selecionar um portfólio de tecnologias em energia renovável aplicável ao caso do estado americano de Oregon, com o intuito de atingir o RPS imposto ao estado. A abordagem foi escolhida devido aos objetivos de alvo impreciso, tendo como resultado de sua aplicação a definição do montante de investimento em cada tecnologia renovável para maximizar a satisfação dos objetivos definidos.

Chen *et al.* (2009) aplicam um processo sistemático de planejamento de portfólio de tecnologias com o uso de análise de cenários para a evolução das energias renováveis em Taiwan. O processo de planejamento se inicia com a obtenção de valores-meta para o desenvolvimento tecnológico baseados em uma pesquisa com líderes da sociedade. Em seguida, com base em opiniões de especialistas e pesquisa bibliográfica, é gerado um conjunto de principais alternativas tecnológicas. Através de um comitê de especialistas técnicos, com experiências profissionais diversificadas, o processo constrói três cenários para abranger as incertezas futuras nas relações entre as alternativas tecnológicas e os valores-meta. Finalmente, através de um segundo comitê de especialistas, o processo avalia indicadores de importância e risco para cada alternativa em cada cenário, escolhendo as tecnologias que

apresentam maior importância tecnológica e menor risco. Com base nos resultados é desenvolvido um plano estratégico geral para o portfólio de tecnologias em energia renovável, o qual é sensível e robusto em relação aos cenários futuros.

Fuss *et al.* (2010) abordam o problema de portfólio de tecnologias através da otimização, considerando o portfólio que apresenta melhor performance, mesmo se o cenário menos favorável em termos de custos se materializar. O trabalho baseia-se na premissa de que é difícil avaliar a importância de diferentes tecnologias para alcançar uma redução robusta dos riscos climáticos de longo prazo à luz de incertezas científicas, (por exemplo, sobre a sensibilidade climática, efeitos de *feedback*), de incertezas de mercado (por exemplo, a volatilidade do preço do combustível), de incertezas tecnológicas (por exemplo, a disponibilidade de tecnologia em energia renovável), de incertezas sócio-econômicas (por exemplo, desenvolvimento de diferentes fatores macroeconômicos) e de incertezas políticas (por exemplo, o compromisso com metas específicas e a estabilidade dos preços do carbono). Neste contexto, analisam o impacto da incerteza sobre a tomada de decisão de investimento ao nível da companhia de geração através de uma estrutura de avaliação de opções reais, e depois utilizam um banco de dados de um cenário proposto como ponto de partida para derivar portfólios de tecnologia ótimos através de diferentes cenários socioeconômicos para uma série de metas de estabilização, focando, em particular, sobre o alvo de baixa emissão e usando medidas de risco alternativas.

#### 2.2.3.2 Outras Aplicações em Energia Sustentável

Rocha & Kuhn (2011) alegam que a abordagem tradicional econômica de portfólio é estática, ou seja, o reequilíbrio da carteira não está previsto, e, portanto, falha em capturar dois aspectos importantes: o *trade-off* entre consequências de curto e longo prazo de uma estratégia de investimento baseada na evolução de parâmetros aleatórios e a presença de custos de transação que afetam as participações no portfólio ao longo do tempo. Com base neste argumento, propõem um modelo de Média-Variância multi-estágio de otimização estocástica para gerenciar um portfólio de contratos de derivados de energia. A abordagem de múltiplos estágios utilizada na programação estocástica permite a modelagem do reequilíbrio do portfólio em vários pontos no tempo futuro, em cada caso, com base nas informações disponíveis até aquele determinado ponto. Para reduzir a complexidade computacional, aplicam duas aproximações: a agregação das fases de decisão e resolução do problema resultante em regras de decisão lineares.

Stirling (2010) apresenta uma estrutura para análise da diversidade energética, que pode ser aplicada para obtenção do mix de energia primária, de portfólios de abastecimento elétrico ou ao fornecimento de serviços de energia. A estrutura é baseada no reconhecimento das propriedades necessárias da diversidade: variedade, equilíbrio e disparidade. O principal argumento para sua utilização é o de que o método de análise multicritério associado ao conceito de diversidade fornece uma maneira mais sistemática, completa e transparente para articular diferentes perspectivas e abordagens e assim ajuda a obter políticas mais robustas e responsáveis.

Hsueh & Yan (2011) aplicaram os métodos Delphi e AHP e a lógica *fuzzy* para construir um modelo de avaliação quantitativa que serve como base para a seleção de uma comunidade-alvo apropriada para desenvolver uma comunidade de baixo carbono. Além disso, o modelo de avaliação pode ser usado para validar o desempenho da comunidade renovada. O modelo se fundamenta no fato de que projetos de reconstrução nacional e regionais trazem desenvolvimento econômico, mas, ao mesmo tempo, são uma das principais causas do aumento no consumo de energia. Portanto, uma das abordagens de implementação de construções de baixo carbono e economia de energia mais pragmáticas é conduzir a avaliação integrada do uso de energia e do desenvolvimento econômico antes de iniciar a construção, para combinar as filosofias de baixo carbono e de economia de energia em vez de impedir a construção.

Beecy *et al.* (2011) definem um conjunto de princípios orientadores genéricos para programas nacionais de redução de emissões economicamente eficientes e eficazes. Estes princípios são usados para projetar um portfólio de políticas nacionais inovadoras e de estratégias tecnológicas que possa ser adotado por economias desenvolvidas e algumas economias em desenvolvimento. Em seguida, a relação custo-eficácia do portfólio de políticas inovadoras e tecnologias é obtida através de medidas de efetividade para um caso-teste.

Komarek *et al.* (2011) examinam as preferências dos *stakeholders* em uma instituição acadêmica acerca dos atributos de estratégias de redução de gases do efeito estufa. Utilizaram para isso um experimento de escolha que permitiu examinar as preferências acerca dos atributos de programas de redução de gases do efeito estufa para três grupos de indivíduos. Os resultados são usados para avaliar as implicações no bem-estar das diferentes combinações dos atributos que coincidem com estratégias alternativas dos programas de redução.

A *Resources for the Future* (RFF), organização não-lucrativa e apartidária sediada em Washington D.C., desenvolveu um modelo econômico que simula os mercados regionais de

eletricidade e o comércio inter-regional de eletricidade nos Estados Unidos continental, considerando regulações para controlar as emissões geradas pelo setor elétrico de óxido de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e mercúrio. Haiku é um modelo de simulação determinístico altamente parametrizado capaz de projetar o equilíbrio de mercado em cada uma das 21 regiões de 48 estados até o ano 2030, durante três estações ao ano e em quatro blocos de tempo dentro de cada temporada (PAUL *et al.*, 2009).

Palmer *et al.* (2011) utilizam o modelo de mercado de energia *Haiku* para avaliar os resultados econômicos e tecnológicos, os benefícios climáticos e a relação custo-efetividade de três principais políticas consideradas nos Estados Unidos para emissões de gases do efeito estufa: um Programa *Cap-and-Trade* (CTP), um *Renewable Portfolio Standard* (RPS) e taxas de crédito para produtores de energia renovável. Foram consideradas as conseqüências de cada uma destas políticas e das combinações possíveis, inclusive destacando a possibilidade de sinergias, as quais são referenciadas como “interações que levem a um total diferente da soma das partes”.

Lixin (2011) aplica um modelo de decisão multiobjetivo baseado em uma função objetivo aditiva para minimizar os investimento em energia e os custos de controle da poluição ambiental. Devido às diferenças entre as unidades das variáveis de decisão elas são todas convertidas em carvão padrão. Este modelo é usado como proposta para otimizar a estrutura energética da China nos próximos dez anos.

Kranzl *et al.* (2006) utilizam uma metodologia para compor um portfólio de políticas eficiente de acordo com uma meta de redução de  $\text{CO}_2$ . Isto é feito através da aplicação de um modelo computacional, o *Invert simulation tool*, desenvolvido para simular os impactos de vários esquemas de promoção de sistemas eficientes de energia renovável.

Streimikiene & Šivickas (2008) desenvolveram uma estrutura de indicadores para análise dos requisitos das principais diretrizes da União Européia (UE) em desenvolvimento energético sustentável, procurando identificar as interligações entre os principais indicadores que tratam das prioridades da política energética da UE e acompanhar a interação dos instrumentos políticos com o objetivo de atingir diferentes metas estabelecidas pelas diretrizes apropriadas. O trabalho apresenta uma análise dos principais documentos políticos e diretrizes que abordam metas para o desenvolvimento de energias sustentáveis e definem políticas e medidas para alcançá-las. Além disso, o artigo fornece: (1) uma avaliação do impacto de políticas e medidas implementadas nos Estados Bálticos sobre as metas de desenvolvimento energético sustentável da UE; (2) uma análise comparativa das tendências dos indicadores de

eficiência energética, renováveis e emissão de gases do efeito estufa nos Estados Bálticos; (3) uma análise do uso de biomassa nos Estados bálticos; e (4) Avaliação de interações entre os instrumentos baseados no mercado objetivando fornecer recomendações sobre a implementação do portfólio de políticas.

Como parte de um projeto para avaliar o valor de novas tecnologias energéticas, um grupo internacional de pesquisadores criou um modelo de programação linear para sistemas de energia nacional descrito por Fishbone & Abilock (1981). Este modelo, MARKAL, é orientado a processos dinâmicos do sistema energético, o que permite uma representação detalhada de tecnologias de energia para oferta e demanda. É um modelo impulsionado pela demanda de energia útil, que otimiza ao longo de períodos diversos coletivamente e permite a realização de análises multiobjetivo.

A sustentabilidade exige que os problemas sejam resolvidos em um contexto completo de sistemas, o que significa que deve haver uma compreensão das inter-relações entre as partes de um sistema, por exemplo, o capital humano e natural, bem como o capital econômico, nas comunidades, regiões, países e no mundo (JUNIPER & MOORE, 2002).

No âmbito da análise global, Rafaj *et al.* (2006) propõem uma avaliação do impacto de um portfólio de instrumentos políticos para lidar com diferentes preocupações de sustentabilidade no sistema energético global em áreas de mudanças climáticas, poluição do ar e introdução de recursos em energia renovável. A análise foi realizada utilizando a versão multi-regional do MARKAL, o Modelo MARKAL Global (tradução livre do inglês: *Global MARKAL Model* – GMM). O GMM é um modelo de sistema de energia de equilíbrio parcial, ou seja, apenas o setor de energia é descrito, e apresenta abordagem *bottom-up*, pois é específico para tecnologias. Permite uma representação detalhada das opções de tecnologia de energia em ambos os lados da demanda e da oferta do sistema de energia completo para cinco regiões do mundo. Os efeitos de um conjunto político contendo três instrumentos implementados individualmente ou combinados foi examinado. Os instrumentos políticos em análise incluem: políticas *Cap-and-Trade* impondo uma meta de redução de emissões de CO<sub>2</sub> no sistema global de energia, um RPS que obriga uma percentagem mínima de produção de eletricidade renovável, e a internalização dos custos externos de geração de energia associados à poluição local. Os efeitos positivos são amplificados quando os instrumentos de política são simultaneamente aplicados, ilustrando o potencial de sinergias entre estas políticas energéticas.

No que tange à análise da transmissão de energia, Bishop *et al.* (2009) apresentam um modelo de otimização recursiva que visa criar um vínculo entre uma política nacional de energia elétrica sustentável e o desempenho das suas rede de transmissão, reconhecendo que as redes de transmissão podem melhor se ajustar à política sustentável se forem co-projetadas e otimizadas. O resultado desta abordagem é obtido para o caso de Portugal e consiste em um conjunto geral de tipos de geradores e combustíveis que aumenta a diversidade do fornecimento de energia português, diminui sua dependência de combustíveis importados em 14,62% e leva o país a cumprir suas obrigações regional e internacional de gerar 31% da energia a partir de fontes renováveis até 2020 e de reduzir em 27% as emissões de gases de efeito estufa até 2012, respectivamente. A quantidade e a composição de geração de energia em cada linha são especificadas, com particular destaque para a quantificação do montante da geração distribuída. O modelo demonstra que a política energética nacional e a implantação técnica podem ser relacionadas através de sustentabilidade e, além disso, que os respectivos objetivos podem ser mutuamente alcançados através de um plano integrado.

A fase de transição para um sistema de energia sustentável é abordada em Kern & Smith (2008). A partir de uma teoria sócio-técnica multi-nível que fornece as bases da Gestão de Transição analisa-se o projeto de transição energética adotado na Holanda, conhecido por Projeto de Transição de Energia, cuja sigla em inglês é ETP. A teoria a que se refere é a Teoria da Transição, segundo a qual transições são descritas como processos de transformação social em que um sistema muda estruturalmente ao longo de um extenso período de tempo (Rotmans *et al.*, 2001). No modelo de Gestão de Transição visões positivas do futuro desempenham um papel importante na definição de metas de longo prazo e no desenvolvimento de caminhos ao longo dos quais esses objetivos podem ser alcançados. O modelo sugere ultrapassar redes políticas existentes (possivelmente capturadas) através do estabelecimento de arenas de transição.

Hofman & Li (2009) utilizam dados históricos para realizar uma análise de regressão que permite fazer projeções acerca da produção e consumo de energia no Canadá. O resultado dessa análise é uma equação, que é usada para fazer previsões sobre a evolução futura do setor da energia. Usando esta previsão, são desenvolvidas maiores análises a partir de dois pontos de vista: o ponto de vista do equilíbrio energético (equilíbrio entre a produção e o consumo de energia) e o ponto de vista do impacto ambiental.

Möller *et al.* (2011) discutem a implantação do equilíbrio energético através do gerenciamento de portfólios de energia para o caso particular do mercado alemão. São

identificadas e modeladas três estratégias que refletem a interação do balanceamento do mercado de energia com outros mercados de eletricidade e correspondentes incentivos econômicos. O modelo utilizado abrange quatro fatores que influenciam o balanceamento da demanda de energia em diferentes escalas de tempo. Estes fatores são: o gradiente de carga, o incentivo de mercado do dia anterior, o incentivo técnico e a posição de mercado. Além disso, o modelo inclui o risco de eventos não-previsíveis. No geral, a experiência obtida do balanceamento de mercado de energia alemão demonstra que o mercado responde a incentivos definidos pela estrutura do mercado e indica que o balanceamento energético é um componente integral do gerenciamento de portfólio energético. Conseqüentemente, o mercado de energia balanceado ajuda a direcionar investimentos para a extensão de capacidade mais econômica e procedimentos de previsão para garantir a segurança do sistema. Estes fatores são fundamentais para adaptar o mercado elétrico ao desafio de integrar uma maior parcela de renováveis.

Quando à avaliação de políticas após a sua implantação, Palmer & Burtraw (2005) desenvolveram uma análise dos efeitos das duas principais políticas governamentais destinadas a aumentar a contribuição das energias renováveis para o fornecimento total de eletricidade nos Estados Unidos. As políticas consideradas são o crédito de taxas para determinados tipos de energias renováveis, conhecido em nível federal nos Estados Unidos como o Crédito de Produção de Energia Renovável (tradução livre do inglês: *Renewable Energy Production Credit – REPC*) e a exigência imposta pelos RPSs. Para avaliá-las foram considerados os efeitos destas políticas sobre os custos, as decisões de investimento da companhia elétrica, o mix de tecnologias e de combustíveis usados para gerar eletricidade, e sobre a geração renovável por região. Também analisaram os efeitos destas políticas sobre os preços da eletricidade e as emissões de carbono a partir de geradores de eletricidade. Por fim, analisam os efeitos de diferentes pressupostos tecnológicos, o papel da aprendizagem e o papel das premissas sobre o preço de combustíveis.

Pugh *et al.* (2011) discutem sobre duas abordagens analíticas baseadas em métodos heurísticos para análise de portfólio que foram utilizadas para desenvolver percepções iniciais para apoiar decisões acerca do financiamento de um portfólio de P&D em energia. As abordagens são caracterizadas pelas restrições sob as quais foram conduzidas: limitações de tempo e por estarem sujeitas a controles institucionais relativos à avaliação de incertezas. A primeira tem como base o conjunto de cenários do *Climate Change Technology Program* (CCTP) de 2006 e define o valor de uma tecnologia em termos da quantidade de emissões de

carbono que reduz, uma métrica que apresenta importantes desafios conceituais, mas que está bastante presente em discussões sobre tecnologia relacionadas a mudanças climáticas. A segunda se baseia no conjunto de cenários mais extenso do CCTP de 2008 e define o valor de uma tecnologia em termos de redução de custos associados ao seu uso em um portfólio. Em ambos os casos os benefícios esperados de uma tecnologia são estimados utilizando uma metodologia de ponderação baseada no risco, a qual tenta incorporar os efeitos de ambas as técnicas e riscos de mercado, concordando com o fato de que a P&D deve ser considerada no contexto de outros fatores importantes. O portfólio é construído com base em um *ranking* relacionado ao retorno sobre o investimento associado a diferentes níveis de disponibilidade de investimentos federais em P&D. O mérito relativo das duas abordagens e as oportunidades de melhoria também são discutidos.

Liu & Wu (2007) abordam o problema de alocação ótima da energia produzida por uma companhia de geração entre múltiplos mercados como um problema geral de otimização de portfólio, com o objetivo de maximizar os seus benefícios e minimizando o risco correspondente. Para solucionar o problema utilizam a Teoria Moderna do Portfólio, considerando a aversão dos decisores ao risco e a correlação estatística entre os resultados das alternativas.

Ainda no contexto das ferramentas financeiras, Oliveira *et al.* (2011) apresentam uma nova abordagem para ajustar a métrica do valor de risco condicional (CVaR) ao mix de contratos nos mercados de energia, usando o *Mixture Design of Experiments* (MDE). Neste tipo de estratégia experimental, os fatores de projeto são tratados como proporções em um sistema de mistura considerado bastante adequado para o tratamento de portfólios em geral. Em vez de utilizar a programação linear tradicional, o conceito de função desejabilidade é aqui usado para combinar as funções objetivo multi-resposta não lineares para a média com a variância de um portfólio específico obtida através do MDE. A maximização da função desejabilidade está implícita na otimização de portfólio, gerando uma fronteira de recrutamento eficiente. Esta abordagem oferece três principais contribuições: inclui a aversão ao risco na rotina de otimização, avalia interações entre os contratos e diminui o esforço computacional necessário para resolver o problema de otimização restrita não-linear.

Bhattacharya & Kojima (2010) aplicam os conceitos de otimização de portfólio da área de finanças para demonstrar o alcance de uma maior utilização de energias renováveis, com a possibilidade de redução do risco de investimento embutido no setor de energia elétrica convencional e da sua carga financeira. O estudo demonstra que o investimento em energias



renováveis pode compensar os riscos associados com os custos totais de entrada. Tais custos seriam as volatilidades externas dos preços dos combustíveis fósseis, os custos de capital, custos operacionais e de manutenção e os custos de carbono. Com base neste estudo, a comparação explícita dos valores monetários dos riscos de investimento de fontes de energia convencionais e renováveis mostra que as energias renováveis apresentam alta competitividade no mercado. Concluem com uma recomendação de que, como um objetivo de negócio, os investidores seriam beneficiados concentrando-se na minimização do risco do portfólio de fornecimento de eletricidade ao invés do custo. Isso também poderia inerentemente aumentar a oferta de energia renováveis no mercado.

Michalena *et al.* (2009) estudam a implementação de tecnologias de energia renováveis em ilhas do Mediterrâneo, a fim de testar se a classificação das ilhas é possível com base na abordagem de energia renovável utilizada, se há algum grau de correlação entre energias renováveis e desenvolvimento do turismo sustentável e se um caminho para o desenvolvimento do turismo temático poderá ser aberto por meio de estratégias e infra-estruturas com base em energia renovável. Para atingir estes objetivos foi desenvolvida uma estrutura que avalia aspectos institucionais e de governança. Nesta estrutura, primeiro são identificados os direcionadores estratégicos para a implementação de tecnologias em energia renovável e, então, as ilhas são agrupadas de acordo com esses direcionadores. No passo seguinte, são interpretados e identificados os elementos dominantes das várias estratégias de integração das tecnologias em energia renovável para estes grupos. A análise mostra que as estratégias relacionadas com a implementação de tecnologias em energia renovável podem ser classificadas em quatro grupos diferentes na motivação e *status* atual de implementação da tecnologia. O próximo passo conecta os grupos ao tipo de turismo dominante identificado em cada ilha. Nesta fase, a análise mostrou que os grupos formados são compatíveis com as características qualitativas do turismo, no sentido de que os grupos de tecnologia foram associados a características qualitativas específicas do turismo de negócios. De posse destas informações torna-se possível identificar causalidades específicas entre as tecnologias e a atividade do turismo e de produzir um diagrama conceitual que mostra graficamente a relação entre tecnologias e turismo, quando uma abordagem política específica é realizada.

A tradicional análise econômica, como a análise custo-benefício e indicadores macroeconômicos, não é suficiente para integrar todos os elementos incluídos num plano de energia ambientalmente completo. Por outro lado, os métodos multicritério fornecem uma ferramenta que é mais apropriada para montar e lidar com uma ampla gama de dimensões que

são avaliadas de formas diferentes e, dessa forma, oferecem apoio à decisão válido (TSOUTSOS *et al.*, 2009).

Tsoutsos *et al.* (2009) exploram a abordagem multicritério para o planejamento energético sustentável na ilha de Creta, na Grécia. Um conjunto de alternativas de planejamento energético é determinado para a implementação de instalações de fontes de energia renováveis na ilha e as alternativas são avaliadas em relação a critérios econômicos, técnicos, sociais e ambientais identificados pelos atores envolvidos na área de planejamento energético. Segundo os autores, o estudo se mostrou uma análise exploratória com potencial para ajudar os tomadores de decisão responsáveis pelo planejamento energético regional, proporcionando-lhes a possibilidade de criar classificações para alternativas de energias sustentáveis.

Allan *et al.* (2011) examinam o portfólio de geração de energia existentes na Escócia e os direcionadores de mudanças para os próximos dez anos através do modelo da Média-Variância. Os cenários estudados se baseiam em cenários recentes para o portfólio de energia. Cada um dos cenários estudados implica um custo de eletricidade para o portfólio que é cerca de 22% a 38% maior do que o custo do portfólio de eletricidade escocês em 2007. Os cenários provaram ser “ineficientes” para a média-variância no sentido de que, portfólios de menor variância podem ser obtidos sem aumentar os custos do portfólio, geralmente através da expansão da quota de energias renováveis. O trabalho se destaca por concluir para o caso estudado, através da análise de sensibilidade realizada, que as tecnologias de geração maremotriz podem contribuir para portfólios de menor risco e não aumentam o custo do portfólio.

#### 2.2.4 Síntese do Estado da Arte e Posicionamento deste Trabalho

Conforme discutido anteriormente neste capítulo, um problema de portfólio pode ser abordado segundo quatro paradigmas distintos: avaliação, alocação, seleção e construção. Devido aos modelos econômicos geralmente terem seu foco voltado para investimentos, aplicam-se aos paradigmas de avaliação e construção de portfólios. A avaliação é construída a partir de índices financeiros e os modelos de construção se baseiam no balanceamento entre medidas de retorno e risco.

A Teoria dos Jogos fornece as ferramentas mais utilizadas para lidar com o paradigma de alocação. Este paradigma está geralmente associado a problemas políticos, onde se tem um

grupo de partidos responsáveis pela construção de uma política e deseja-se formular uma política consensual, por exemplo.

O paradigma de seleção é essencial à área de Gestão de Projetos. Uma profusão de modelos existentes na literatura se propõem a resolver o problema de seleção de portfólio, contudo a proporção dos que abordam as sinergias existentes entre projetos ou programas ainda é incipiente. Possivelmente isto ocorre devido a dois fatores: o caráter diverso da sinergia e o fato da sinergia ser uma característica mensurável para grupos de projetos, o que dificulta a sua dissociação.

Entre os modelos utilizados para seleção de portfólio observa-se uma prevalência de abordagens de otimização, especialmente considerando-se múltiplos objetivos. Percebe-se que em alguns trabalhos as sinergias são consideradas antes da aplicação do modelo de seleção, atuando como um filtro de projetos em uma pré-análise ou após a aplicação do modelo, a título de gerar sugestões para discussões em um comitê para elaboração de planos de ação. É importante salientar que em nenhuma destas abordagens as sinergias fazem realmente parte do modelo de seleção, de forma que possam influenciar as preferências por uma ou outra alternativa juntamente com os critérios considerados.

A consideração da sinergia apenas como uma restrição do problema também deve ser tratada com cuidado, uma vez que através de restrições pode-se apenas estabelecer um valor mínimo de sinergia necessário para que o portfólio seja escolhido ou exigir que os projetos sinérgicos façam parte do portfólio selecionado. A forma que integra as sinergias ao modelo mais eficiente é a sua consideração como ajuste aos valores individuais dos projetos.

Foram abordadas as tendências globais em políticas energéticas e os programas adotados pelo governo brasileiro. Pode-se perceber que entre os diversos instrumentos políticos existentes para fomentar a sustentabilidade energética alguns já fazem parte dos programas brasileiros, como por exemplo, o financiamento de projetos de P&D, a padronização, leilões de energia, medidas de educação e divulgação, entre outros.

A revisão acerca dos modelos de decisão utilizados em problemas relacionados à energia sustentável permite concluir que a aplicabilidade da Pesquisa Operacional, em especial os métodos de AMD, à área em estudo é extremamente vasta. Tal fato se deve às várias dimensões associadas aos problemas e a sua complexidade.

São encontradas na literatura aplicações de modelos de decisão em energia sustentável, principalmente modelos econômicos, métodos de apoio multicritério à decisão, modelos de otimização e heurísticas.

Devido à crescente preocupação com a sustentabilidade, questões relativas às tecnologias empregadas nos sistemas estão ganhando importância no processo decisório. Preocupações sobre que tipos de tecnologias devem ser utilizados, que parcelas serão atribuídas a cada uma delas e quais novas tecnologias devem ser fomentadas são cruciais para alcançar os objetivos políticos, respeitando as limitações dos sistemas e a regulação em vigor.

Apesar da variedade de metodologias, devem ser observadas as particularidades de cada aplicação, com o intuito de garantir que o método utilizado considere tais características. Além da estrutura e evolução da matriz energética do país deve-se levar em conta o domínio tecnológico, a disponibilidade de recursos e quais energias renováveis mais se alinham com a estratégia energética de longo prazo.

Em relação ao problema de portfólio, poucos são os modelos aplicados que consideram o uso das sinergias. O próprio conceito de sinergia quando abordado neste âmbito carece de contextualização e análise dos aspectos envolvidos. Além disso, não há modelos de elicitação de sinergias formalizados na literatura. Inclusive, apesar da diversidade de métodos utilizados para resolver problemas de decisão em energia sustentável e da visibilidade crescente da elaboração de políticas em energia sustentável a literatura sobre sinergias entre este tipo de políticas ainda é incipiente.

Este trabalho se propõe a analisar a consideração de sinergias no problema de portfólio, com o intuito de desenvolver e formalizar modelos de elicitação de sinergias. Aliado às contribuições teóricas para a modelagem da elicitação deseja-se inserir a problemática de portfólio no contexto de elaboração de políticas em energia sustentável, com o objetivo de não apenas obter recomendações que permitam criar planos de ação plausíveis, mas também para promover a proliferação de estudos sobre sinergias entre políticas energéticas sustentáveis.

### **3 AVALIAÇÃO DE FONTES DE ENERGIA ALTERNATIVAS**

O desenvolvimento de políticas energéticas é uma questão que está relacionada a um contexto amplo e envolve aspectos de natureza diversa. A introdução da sustentabilidade como uma meta a ser alcançada, a fim de manter o fornecimento de energia e permitir o desenvolvimento econômico e social de um país, aumenta a complexidade das decisões a serem feitas. No contexto do problema de seleção de portfólio de políticas energéticas sustentáveis uma decisão que precisa ser previamente tomada diz respeito a quais fontes renováveis devem ser incluídas na matriz energética. Tal decisão tem sido praticamente um pré-requisito para tornar um sistema energético sustentável possível, pois define para que tecnologias serão direcionadas as políticas desenvolvidas.

A avaliação de fontes alternativas pode fornecer uma métrica adequada para apoiar o processo de escolha. A aplicação de métodos multicritério para avaliar fontes de energia apresenta a vantagem de incorporar as diferentes dimensões consideradas neste tipo de problema. Além disso, permite considerar aspectos quantitativos e qualitativos simultaneamente. Neste capítulo optou-se por utilizar o método multicritério PROMETHEE para avaliar quais fontes alternativas estão melhor alinhadas com a política energética brasileira, tendo em vista aliar aos benefícios do uso de uma ferramenta multicritério a abordagem não compensatória, a qual favorece alternativas mais balanceadas. Outro aspecto relevante é a possibilidade de utilização do critério verdadeiro no contexto não compensatório, através de uma abordagem simples e de fácil utilização, que apresenta inclusive implementações computacionais bem estabelecidas. A aplicação do PROMETHEE I e II fornece uma pré-ordem parcial e uma pré-ordem completa, respectivamente. A análise destes resultados obtidos permite a elaboração de recomendações ao decisor. Apesar da estratégia em energia renovável brasileira já estar delineada para os próximos anos este estudo permite sugerir um direcionamento futuro para o longo prazo.

#### **3.1 Seleção de Fontes Alternativas a serem Incorporadas na Matriz Energética Brasileira**

O Plano Nacional de Energia 2030 tem várias ações a serem consideradas para implementação no horizonte planejado. Algumas dessas ações geram novos problemas de decisão, como a expansão do uso de fontes alternativas. Uma decisão importante a ser feita

neste contexto se refere às fontes alternativas que devem ser prioritariamente incluídas no plano de expansão. Tal decisão não deve ser tomada de forma isolada. Deve-se considerar os objetivos do plano, o contexto atual de energia, além de aspectos tecnológicos, econômicos, sociais e ambientais.

Em relação à expansão do uso de fontes alternativas, O Plano Nacional de Energia considera possível implementar as seguintes fontes: (1) Biomassa; (2) Aerogeradores, (3) Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs); (4) Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), (5) Solar fotovoltaica e (6) Nuclear.

A escolha dos critérios reflete o principal objetivo do plano: a busca de um sistema energético sustentável. A sustentabilidade repousa sobre dois pilares: eficiência energética e fontes renováveis. O Plano Nacional de Energia destaca também como um meio de alcançar seus objetivos a diversificação da matriz energética, visando reduzir a dependência nacional de uma fonte de energia dominante. Os critérios devem também abordar as dimensões tecnológica, econômica, social e ambiental. Considerando isso, os principais critérios usados nesta avaliação são:

- Eficiência: mede a porcentagem de conversão de energia pela fonte. A ANEEL (2008) fornece dados sobre faixas de eficiência para cada fonte, uma vez que a eficiência depende também de características técnicas do gerador. Neste estudo, foi decidido usar o valor inferior da faixa, a fim de assegurar que pelo menos a eficiência mínima estará disponível;
- Investimento: representa o preço médio para geração de eletricidade para cada fonte de energia. Os valores de referência estão disponíveis em MME & EPE (2007) e estão expressos em dólares por quilowatt gerado;
- Estágio tecnológico: indica o estágio de desenvolvimento em que a tecnologia se encontra. O critério foi avaliado em uma escala qualitativa de três níveis: introdução, crescimento e maturidade;
- Emissões de CO<sub>2</sub>: indica se a fonte emite ou não CO<sub>2</sub>. Uma escala binária foi utilizada;
- Impacto Social: atribui o grau de impacto gerado pela fonte à sociedade. Representado por uma escala qualitativa de três níveis - baixo, moderado e alto - considera os seguintes aspectos para a avaliação: impacto na saúde e segurança da população, o deslocamento das comunidades e o impacto sobre reservas indígenas;
- Diversidade: mede o grau de contribuição da fonte para a diversidade da matriz energética. Representada através de uma escala de três níveis: nenhuma, baixa e alta.

Quanto à definição de critérios relacionados ao impacto social cada área adota as particularidades relevantes para a análise que deseja realizar. Por exemplo, para atender a necessidade de análises econômicas o impacto social pode ser fragmentado em indicadores de atividade econômica, renda, mobilidade social, entre outros. Para este trabalho o termo impacto está associado a consequências, no sentido definido nas áreas de Teoria da Decisão e Apoio a Decisão de uma maneira geral.

Para avaliar as alternativas em relação aos critérios qualitativos foram designados especialistas nas áreas critérios. A Tabela 3.1 apresenta as avaliações das fontes de energia consideradas para cada um dos critérios descritos.

Os pesos dos critérios foram obtidos utilizando o Swing Weighting (GOODWIN & WRIGHT, 1991), onde o decisor escolhe o critério mais importante e atribui 100 pontos a ele, eliminando-o do processo. Em seguida, o decisor escolhe novamente o critério mais importante entre os critérios que restaram na análise e atribui um valor abaixo dos 100 pontos. Esta operação é repetida para todos os critérios. Por fim, os pesos foram transpostos para uma escala normalizada de zero a um. O conjunto dos pesos resultante é apresentado na Tabela 3.2.

*Tabela 3.1 – Avaliação das Alternativas*

Fonte	Eficiência (%)	Investimento (USD/kW)	Estágio Tecnológico	Emissões de CO <sub>2</sub>	Impacto Social	Diversidade
Biomassa	18	900	Crescimento	Sim	Baixo	Alto
Aerogeradores	24	1200	Crescimento	Não	Baixo	Alto
PCH	90	1200	Maturidade	Não	Alto	Nenhum
RSU	18	1250	Crescimento	Sim	Baixo	Alto
Solar	14	6000	Introdução	Não	Moderado	Alto
Nuclear	33	2200	Maturidade	Sim	Moderado	Baixo

*Tabela 3.2 – Pesos dos Critérios*

Critério	Eficiência	Investimento	Estágio Tecnológico	Emissões de CO <sub>2</sub>	Impacto Social	Diversidade
Peso	0,21	0,17	0,11	0,21	0,16	0,14

Decidiu-se atribuir a todos os critérios de preferência a função usual, onde qualquer diferença entre as avaliações das alternativas implica uma preferência estrita, portanto, não

necessita de limiares. A escolha de tal função para os critérios quantitativos ocorreu devido aos valores das avaliações serem arranjados de tal forma que as diferenças são significativas e indicam preferência por si só. Para os critérios qualitativos a própria definição da escala é fundamental para ter uma indicação de preferência, além disso, devido à pequena quantidade de pontos de escala não é prudente determinar limiares.

Uma vez que tal informação seja conhecida, o PROMETHEE I foi aplicado através de software *Decision Lab*, fornecendo uma pré-ordem parcial mostrada na Figura 3.1. Observa-se que os pares de alternativas (Biomassa, PCHs) e (RSU, Nuclear) são incomparáveis, pois a comparação de seus fluxos positivos e negativos são conflitantes. Na figura 1 pode-se concluir o seguinte: (1) Aerogeradores sobreclassifica todas as outras alternativas, (2) Pequenas Centrais Hidrelétricas e Biomassa sobreclassificam as fontes Resíduos Sólidos Urbanos, Nuclear e Solar Fotovoltaica, (3) Resíduos Sólidos Urbanos e Nuclear sobreclassificam Solar Fotovoltaica, e (4) Solar Fotovoltaica não sobreclassifica nenhuma das outras fontes alternativas.

A recomendação obtida do PROMETHEE I é a seguinte: como uma prioridade, implementar Aerogeradores, em segunda instância, Pequenas Centrais Hidrelétricas e Geradores à Biomassa; em terceira instância, incentivar a criação de geradores movidos a Resíduos Sólidos Urbanos e Nucleares, e por último, geradores Solar Fotovoltaicos.

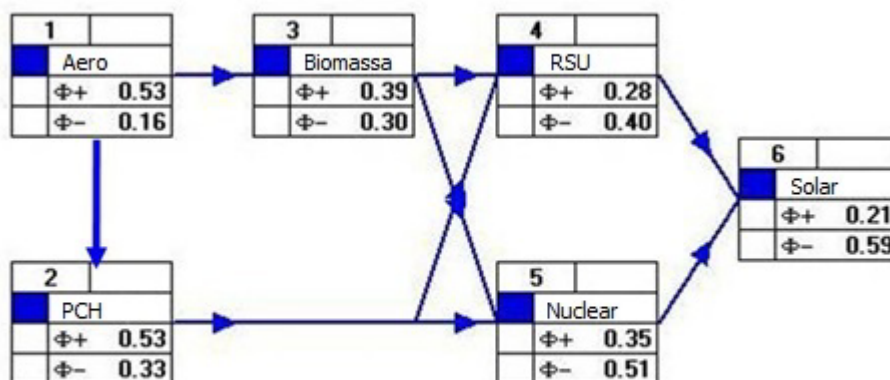


Figura 3.1 – Ranking Parcial

O PROMETHEE II foi aplicado por meio do cálculo dos fluxos líquidos, proporcionando uma pré-ordem completa mostrada na Figura 3.2. Deve-se notar que este *ranking* omite informações de incomparabilidade. Além disso, os fluxos líquidos obtidos para algumas alternativas são negativos. O fluxo líquido pode ser positivo ou negativo. No caso em que é positivo, a ação sobreclassifica mais do que é sobreclassificada pelas outras, ou seja,



expressa a vantagem dessa alternativa sobre todas as outras, caso contrário, o fluxo líquido será negativo. Portanto, pode-se concluir que as alternativas Resíduos Sólidos Urbanos, Solar Fotovoltaica e Nuclear apresentam mais desvantagens do que vantagens em relação a outras alternativas.

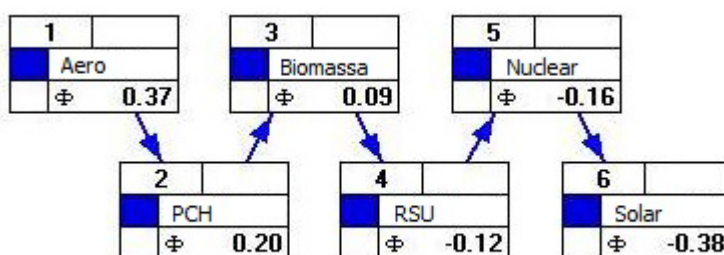


Figura 3.2 – Ranking Completo

A aplicação do PROMETHEE II permite completar a recomendação com uma sugestão de prioridade para a implementação de Aerogeradores, PCH e Biomassa. Por ser uma fonte de energia limpa e ter baixo impacto social a energia eólica é favorecida, apesar de estar em um estágio tecnológico ainda não estabelecido, e portanto, resultar em investimentos relativamente altos. Apesar do histórico energético do país, Aerogeradores são a fonte alternativa que mais se alinha com os objetivos do Plano Nacional, incluindo o incentivo à diversificação. A importância das PCHs e Biomassa vem de investimentos realizados por anos nestes setores, o que tornou as tecnologias mais acessíveis. Além disso, a alta eficiência das usinas hidrelétricas é uma vantagem enorme.

Apesar das semelhanças, Resíduos Sólidos Urbanos apresenta-se em desvantagem em relação à geração à Biomassa, visto que o país é um especialista no uso de biocombustíveis, especialmente os produtos da cana-de-açúcar. Apesar de estar em um estágio tecnológico mais avançado - oferecendo custos progressivamente mais acessíveis - e de sua eficiência relativamente alta, a energia Nuclear está em desvantagem devido ao impacto social que ela acarreta e sua baixa contribuição para a diversidade.

O alto investimento da geração Solar Fotovoltaica e sua eficiência relativamente baixa, ainda a coloca em desvantagem em relação às fontes de maior impacto social e mais poluentes. No entanto, o país deve investir em pesquisa e desenvolvimento nesta área, uma vez que o avanço tecnológico e melhor adequação ao mercado pode tornar essa fonte estrategicamente vantajosa.

A análise de sensibilidade foi realizada variando os pesos critérios. Observou-se que para variações de até 21% nos pesos não houve mudança na ordem das três alternativas em melhor posição. O Plano GAIA foi usado para fornecer uma melhor visualização da relação entre os critérios, conforme apresentado na Figura 3.3.

Pode ser observado no Plano GAIA que os critérios eficiência e estágio tecnológico estão quase completamente alinhados, expressando preferências semelhantes. Emissões de CO<sub>2</sub> e Investimento são quase completamente opostos, o que indica o conflito entre estes critérios. A alternativa Aerogeradores está alinhada com o critério Impacto Social, o que representa o seu bom desempenho neste critério.

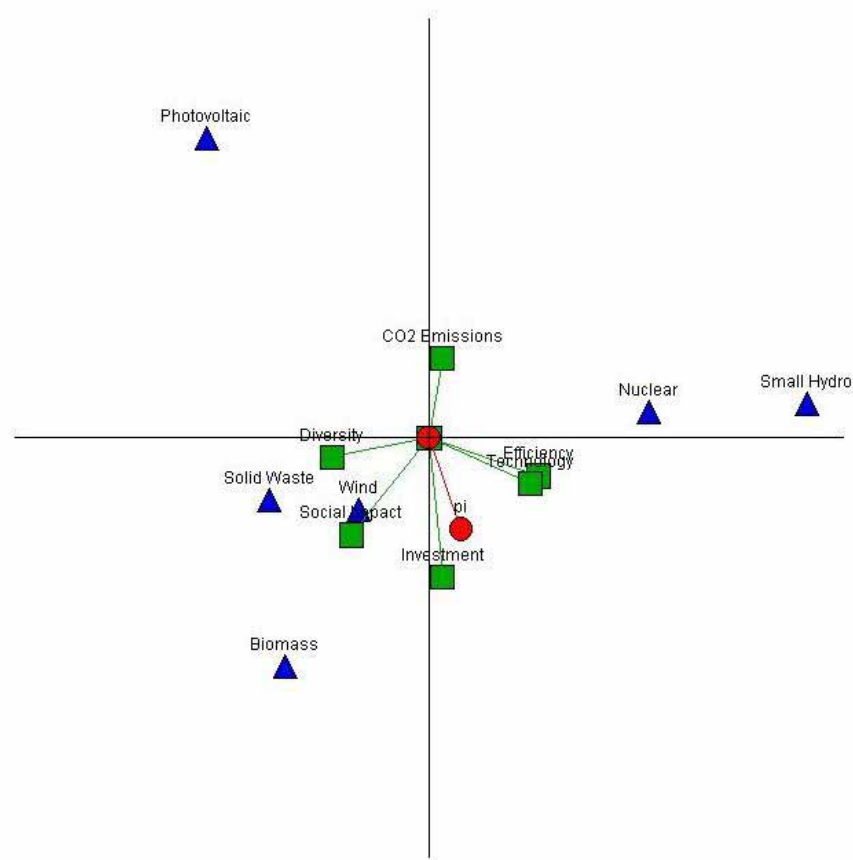


Figura 3.3 – Plano Gaia

### 3.2 Síntese do Estudo

Dado que a geração de energia é um dos principais contribuintes para as emissões de gases de efeito estufa, o Brasil está numa posição privilegiada em termos globais. A parcela de fontes renováveis na oferta interna de energia é uma das mais altas do mundo. Isto ocorre devido à predominância de hidrelétricas na geração de eletricidade do país. Mas o

crescimento do consumo combinado com a necessidade de expandir a oferta de energia para melhor servir a população e permitir o crescimento econômico exige a inclusão de fontes alternativas na matriz energética.

O Plano Nacional de Energia coloca a inserção de fontes alternativas de energia como uma política a ser considerada. No entanto, uma decisão posterior a esta política é a escolha de fontes alternativas a serem implementadas. Neste capítulo decidiu-se aplicar um método multicritério para o problema das fontes alternativas de energia, dada a necessidade de cumprir metas relacionadas a diferentes aspectos. O método PROMETHEE provou ser uma boa opção nesse sentido, por combinar uma abordagem matemática clara e concisa com ferramentas gráficas que facilitam a compreensão do decisor.

Diante das possíveis estratégias para a evolução da matriz energética, permanecer no *status quo* não parece ser a estratégia mais adequada para atingir os objetivos planejados. A aplicação do PROMETHEE fornece uma melhor estratégia alinhada: investindo principalmente em energia eólica e em menor grau em Pequenas Centrais Hidrelétricas e Geração à Biomassa.

É válido ressaltar que o processo de planejamento não cessa no final do período considerado. Portanto, os investimentos em Pesquisa e Desenvolvimento devem ser realizados hoje para criar novas alternativas no futuro. Neste sentido, Aerogeradores, Células Fotovoltaicas e Biomassa parecem ter um grande potencial a ser explorado.

## 4 MODELO MULTICRITÉRIO PARA SELEÇÃO DE PORTFÓLIO

No capítulo anterior abordamos o problema decorrente da adoção da medida de expansão do uso de fontes alternativas, que consiste na seleção das fontes alternativas de energia a serem implantadas. Neste capítulo retornamos ao problema inicial de seleção das medidas que irão compor um portfólio de políticas energéticas. Vimos que para o problema de portfólio em questão a incorporação das sinergias entre os elementos que o compõem é relevante e deve ser considerada no modelo adotado.

Almeida & Duarte (2011) apresentam um modelo multicritério para a seleção de portfólio de projetos de Pesquisa e Desenvolvimento considerando a sinergia existente entre eles. Este modelo pode ser generalizado para problemas multicritério de seleção de portfólio, sem que isso implique em uma descaracterização da sua aplicabilidade inicial. Entretanto, tal generalização permite enxergar questões relativas ao modelo de elicitação das sinergias e sua estreita ligação com o tipo de alternativas consideradas e com a percepção do especialista. Tendo como base estas questões, propõe-se um novo modelo de elicitação e este é comparado ao modelo de elicitação utilizado em Almeida & Duarte (2011), permitindo enunciar os principais resultados. Por fim, o modelo para seleção de portfólio utilizando a nova proposta de elicitação é aplicado ao problema de seleção do portfólio de políticas energéticas.

Para facilitar a diferenciação, o modelo de elicitação proposto em Almeida & Duarte (2011) será referenciado como “*modelo de elicitação de sinergia individual*” e a versão proposta neste trabalho será denominada “*modelo de elicitação de sinergia aos pares*”, enfatizando a elicitação característica.

O capítulo está organizado da seguinte forma: o primeiro subitem apresenta o modelo de seleção de portfólio de Almeida & Duarte (2011); em seguida, no segundo subitem a proposta de elicitação de sinergias deste modelo é explicitada; o terceiro subitem propõe uma discussão acerca da elicitação de sinergias e suas particularidades; no quarto subitem é proposto um novo modelo de elicitação de sinergias e os principais resultados da comparação dos dois modelos de elicitação são apresentados; finalmente, o quinto subitem aborda a aplicação do modelo de seleção de portfólio utilizando a elicitação de sinergias aos pares.

#### 4.1 Modelo Multicritério para Seleção de Portfólio com Elicitação de Sinergia Individual

O modelo proposto em Almeida & Duarte (2011) foi desenvolvido para selecionar um portfólio de projetos de Pesquisa e Desenvolvimento no contexto energético. Este modelo pode ser aplicado em um contexto mais amplo de problemas multicritério que considerem a avaliação de sinergias relevante, onde os projetos considerados para compor o portfólio passam a ser denominados alternativas. No contexto de elaboração de políticas energéticas, as alternativas são ações ou medidas isoladas, as quais podem ser referidas como estratégias políticas, que são consideradas para compor um portfólio de programas políticos no setor. Por esse motivo optamos por nos referir a ações durante a explicação dos modelos. Além da adaptação na terminologia, foram realizadas algumas mudanças na notação do modelo de Almeida & Duarte (2011), apenas para facilitar a comparação com o novo modelo e a adequação ao contexto. A construção do modelo abrange duas etapas: (1) a determinação da função objetivo, a qual é composta por uma parcela relativa à avaliação das ações consideradas e outra parcela relativa às sinergias identificadas entre estas ações e (2) a definição do conjunto de restrições.

##### 4.1.1 Função Objetivo

A função objetivo adotada no modelo visa maximizar a avaliação do portfólio, a qual se baseia na avaliação das ações que o compõem ajustadas pelas sinergias presentes. Para construir a função objetivo é necessário determinar duas parcelas. A primeira parcela se refere à avaliação das ações e consiste em uma agregação aditiva das avaliações de cada ação em relação a um conjunto de critérios, enquanto a segunda parcela diz respeito ao ajuste gerado pelas sinergias. A avaliação das ações é descrita a seguir.

Considerem-se  $m$  ações propostas para execução em determinado período, cuja avaliação é realizada acerca de  $n$  critérios. Seja  $X$  o conjunto de ações, tal que  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_m\}$ . Assume-se que as ações são indivisíveis, conseqüentemente, frações ou possíveis versões da mesma proposta são introduzidas no modelo como ações distintas. Cada ação  $X_i$  apresenta um vetor de *scores* ( $z_i$ ), o qual descreve sua *performance* em relação aos critérios.

$$z_i = [z_{i1}, z_{i2}, \dots, z_{in}], \text{ para } i = 1, \dots, m \quad (4.1)$$

Portanto, o conjunto de ações disponíveis pode ser representado através da matriz de *scores*  $Z = [z_{ik}]$ , cujas linhas correspondem aos vetores de *scores* de cada ação e  $z_{ik}$  representa o *score* da ação  $i$  em relação ao critério  $k$ .

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ z_{m1} & z_{m2} & \cdots & z_{mn} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

A avaliação global de cada ação é expressa na forma de uma função valor aditiva, que agrega os *scores* da ação utilizando para tanto constantes de escala relativas aos critérios. Devido à forma aditiva, deve-se ter cuidado especial em relação à escala de avaliação e às constantes de escala, responsáveis por fazer a transformação da escala do critério para uma escala comum. As escalas de avaliação devem permitir que as diferenças entre categorias sejam mensuradas, portanto, devem ser ao menos intervalar em termos de sofisticação. As constantes de escala dos critérios empregados neste método de agregação devem ser normalizadas.

Diante destas considerações, o vetor de constantes de escala é representado por  $w = [w_k]$ , onde  $w_k$  representa a constante de escala relativa ao critério  $k$ :

$$w = [w_1, w_2, \dots, w_n], \text{ onde } \sum_{k=1}^n w_k = 1 \quad (4.3)$$

Para cada ação  $X_i$  o valor da sua avaliação global a luz de todos os  $n$  critérios é expresso pela equação 4.4.

$$v(X_i) = \sum_{k=1}^n w_k z_{ik} \quad (4.4)$$

Denota-se por  $v_i = [v(X_1), v(X_2), \dots, v(X_m)]^T$  o vetor de avaliações globais das ações consideradas.

A parcela referente à avaliação das ações é a soma das avaliações globais das ações presentes no portfólio. Para representar a presença de uma ação em um portfólio é necessário fazer algumas considerações sobre a notação utilizada.

Um portfólio é um subconjunto do conjunto de ações disponíveis ( $X$ ). Seja  $P$  o conjunto de todos os portfólios possíveis. Logo,  $P$  é o conjunto das partes de  $X$  e o número

de elementos de  $P$  é dado por  $|P| = 2^m$ . Um portfólio  $p_r$  pode ser representado através de um vetor de variáveis binárias  $x_i$ :

$$p_r = [x_1, \dots, x_m]$$

$$\text{tal que } x_i = \begin{cases} 1 & \text{se a ação } X_i \text{ pertence ao portfólio} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4.5)$$

para  $r = 1, \dots, 2^m$  e  $i = 1, \dots, m$ .

Portanto, a parcela de avaliação das ações pode ser escrita na forma do somatório a seguir:

$$VA = \sum_{i=1}^m x_i v(X_i) \quad (4.6)$$

ou, alternativamente,

$$VA = \sum_{i=1}^m \left( x_i \sum_{k=1}^n w_k z_{ik} \right) \quad (4.7)$$

A segunda parcela da função objetivo avalia as sinergias presentes no portfólio. Para estabelecer uma medida da sinergia proporcionada pelas ações ao portfólio é necessário que o especialista determine a contribuição individual acrescentada a cada ação pela presença conjunta com outras ações no portfólio. Definem-se os elementos da matriz de sinergia  $S_{ij} = [s_{ij}]$  como o grau de contribuição da ação  $X_j$  para a ação  $X_i$  em valores percentuais de  $X_i$ .

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} s_{11} & \cdots & s_{1m} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ s_{m1} & \cdots & s_{mm} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Portanto, as linhas da matriz  $S_{ij}$  representam as contribuições de todas as outras ações à ação  $X_i$  e as colunas dizem respeito às contribuições da ação  $X_j$  a todas as outras ações. Em decorrência da definição de sinergia todos os elementos da diagonal principal da matriz  $S_{ij}$  são nulos. Significa que não existirá contribuição ocasionada pela interação de uma ação com ela mesma. Logo,  $s_{ij} = 0$  para todo  $i = j$ , onde  $i, j = 1, \dots, m$ .

A própria concepção de sinergia implica na ordem de grandeza do ganho que ela representa. Isto é, parece bastante improvável que a sinergia devido à presença de determinadas ações no portfólio gere um ganho de valor igual ou superior ao valor da ação considerada. Intuitivamente, tal ganho deve ser pequeno o bastante para retratar seu valor perante o benefício proporcionado pela ação, porém alto o suficiente para justificar a consideração das sinergias no modelo. Desse modo, faz-se necessária a definição do parâmetro  $\beta$ , de forma que não seja possível que uma ação apresente contribuição potencial para o portfólio superior ao valor de  $\beta$  (ALMEIDA & DUARTE, 2011).

$$\sum_i s_{ij} \leq \beta_j, \text{ para } j = 1, 2, \dots, m \quad (4.9)$$

A utilização de  $\beta$  faz-se necessária como condição para avaliar a consistência da avaliação subjetiva relativa aos valores das sinergias  $s_{ij}$ .

O fato das sinergias serem medidas em relação ao valor da ação que recebe a contribuição sugere que para se obter a parcela de sinergia adicionada a cada ação devem-se utilizar os valores absolutos destas contribuições individuais. Para tanto é definida a Contribuição de Sinergia para a ação  $X_i$ :

$$CS(X_i) = \sum_{j=1}^m x_j s_{ij} v(X_i) \quad (4.10)$$

É necessário ressaltar, porém, que a existência da Contribuição de Sinergia para determinada ação está condicionada à presença desta ação no portfólio. Portanto, para obter-se a contribuição total de sinergia a um portfólio devem-se somar as contribuições de sinergia para todas as ações  $X_i$  presentes no portfólio, o que equivale a:

$$CS(p_r) = \sum_{i=1}^m x_i CS(X_i) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m x_i x_j s_{ij} v(X_i) \quad (4.11)$$

Estabelecidas as medidas de valor das ações consideradas e das sinergias é possível obter um valor global relativo ao portfólio, que é a função objetivo do modelo. O valor do portfólio equivale à soma da parcela de avaliação das ações com a parcela relativa às contribuições de sinergia presentes no portfólio. A equação 4.12 representa a função objetivo valor do portfólio como a soma destas duas parcelas, que em sua forma expandida equivale à equação 4.13. Na equação 4.14 a função é descrita em termos de  $v(X_i)$  e  $CS(X_i)$ .



$$V(p_r) = VA + CS(p_r) \quad (4.12)$$

$$V(p_r) = \sum_{i=1}^m \left( x_i \sum_{k=1}^n w_k z_{ik} \right) + \sum_{i=1}^m \left( x_i v(X_i) \sum_{j=1}^m (x_j s_{ij}) \right) \quad (4.13)$$

ou em termos de  $v(X_i)$  e  $CS(X_i)$ ,

$$V(p_r) = \sum_{i=1}^m x_i v(X_i) + \sum_{i=1}^m x_i CS(X_i) \quad (4.14)$$

O problema de otimização visa maximizar esta função objetivo. Deseja-se, portanto, maximizar o valor do portfólio dado por  $V(p_r)$ . O problema pode ser então formulado da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \max_{p_r \in P} V(p_r) \\ \text{Sujeito a : } p_r = [x_1, \dots, x_m], \quad x_i \text{ binário para todo } i = 1, \dots, m. \end{aligned} \quad (4.15)$$

Porém, para que o modelo possa melhor representar a classe de problemas de seleção de portfólio, deve-se considerar ainda um conjunto de restrições que permitam capturar algumas particularidades dos casos analisados. No item que se segue são apresentadas as principais restrições consideradas neste tipo de modelo.

#### 4.1.2 Restrições

As restrições permitem incorporar ao modelo as interdependências entre as ações. Para cada problema, vários tipos de restrição podem ser considerados. A literatura apresenta um considerável número de trabalhos que abordam os mais diversos tipos de restrições aplicadas à seleção de portfólio (BRADI *et al.*, 2001; GHAZEMZADEH *et al.*, 1999; KLAPKA & PIÑOS, 2002; WANG & HWANG, 2005). Portanto, a lista de restrições descrita a seguir considera os principais tipos de restrições aplicáveis à classe de problema, sem, contudo, pretender ser exaustiva (ALMEIDA & DUARTE, 2011).

##### 4.1.2.1 Restrições de Recursos

Para o presente modelo, o consumo de recursos pode ser tratado como um conjunto de restrições relativas ao compartilhamento de cada recurso. Sejam  $q$  categorias de recursos disponíveis. Cada ação apresenta um vetor de consumo de recursos  $(c_i)$ :

$$c_i = [c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{iq}], \text{ para } i = 1, \dots, m \quad (4.16)$$

Por conseguinte, o consumo do conjunto de ações disponíveis pode ser representado através da matriz de *consumo*  $C$ , cujas linhas correspondem aos vetores de consumo de cada ação.

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & \cdots & c_{1q} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ c_{m1} & \cdots & c_{mq} \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

Para compor as restrições considere-se  $B$  o vetor de disponibilidade de recursos:

$$B = [b_1, b_2, \dots, b_q] \quad (4.18)$$

Logo, o conjunto de restrições de recursos será tal que:

$$p_r \cdot C \leq B \quad (4.19)$$

#### 4.1.2.2 Restrição de Custo

Comumente são consideradas no processo de seleção as limitações relativas ao financiamento das ações. A restrição de custo deve garantir que o conjunto de ações a ser executado esteja compatível com o capital disponibilizado pela organização para este fim. Seja o vetor de custo das ações ( $R$ ):

$$R = [r_1, r_2, \dots, r_m]^T \quad (4.20)$$

Denotando por  $F$  o capital disponível a restrição de custo é representada por:

$$p_r \cdot R \leq F \quad (4.21)$$

#### 4.1.2.3 Restrições para Ações Mandatárias

Em um conjunto de ações considerado para seleção podem existir ações que, independentemente do conjunto de ações selecionadas, devem ser incluídas no portfólio, com base em certas considerações. Além disso, durante as periódicas revisões do portfólio é comum que algumas ações programadas anteriormente sejam mantidas, devendo, portanto, ser inclusas. É importante modelar a existência de ações mandatárias no portfólio, pois estas ações competem com as outras por recursos escassos e pode ser necessário desenvolver análises de sensibilidade para determinar o custo de oportunidade de incluí-las.

Seja  $S_M$  o conjunto de ações mandatárias a serem consideradas na seleção do portfólio. O conjunto de restrições relativas a ações mandatárias são tais que:

$$x_i = 1, \quad \forall X_i \in S_M \quad (4.22)$$

#### 4.1.2.4 Restrição do Valor de Ações

Pode ser necessário determinar um limite inferior para o valor das ações que irão compor o portfólio selecionado. Neste caso, deseja-se que as ações escolhidas tenham avaliações superiores a determinado limiar  $\alpha$ , o que é retratado por meio da seguinte restrição adicionada ao modelo:

$$\sum_{i=1}^m \left( x_i \sum_{k=1}^n w_k z_{ik} \right) \geq \sum_{i=1}^m x_i \cdot \alpha \quad (4.23)$$

#### 4.1.2.5 Restrições Relacionais

Outras interdependências entre as ações devem ser consideradas por um modelo de seleção e podem ser tratadas através de restrições. As restrições aqui abordadas são encontradas na literatura sob a denominação de restrições lógicas ou estratégicas, porém, no modelo descrito optou-se por usar a terminologia restrições relacionais, haja vista a situação que se propõem abranger (ALMEIDA & DUARTE, 2011). As principais relações existentes entre ações neste contexto se referem a ações dependentes e ações mutuamente exclusivas.

– *Ações Dependentes*: diz-se que uma ação é dependente de outra se para a primeira ser selecionada a segunda necessariamente deve ser incluída no portfólio. Por outro lado, a segunda ação pode ser inclusa no portfólio mesmo que a primeira não o seja. Este tipo de interdependência entre ações será modelado pela seguinte restrição:

$$x_i - x_j \geq 0, \text{ onde a ação } X_j \text{ depende da adoção da ação } X_i \quad (4.24)$$

– *Ações Mutuamente Exclusivas*: um conjunto de ações é considerado mutuamente exclusivo se apenas uma delas pode ser inclusa no portfólio, ou seja, uma vez que uma das ações do conjunto é adotada as outras devem ser excluídas do portfólio. A restrição que traduz esta interdependência é dada por:

$$\sum_{X_i \in S_{MC}} x_i \leq 1, \text{ onde } S_{MC} \text{ é o conjunto de ações mutuamente exclusivas.} \quad (4.25)$$

Determinadas a função objetivo e as restrições, a formulação do problema está completa. O próximo item resume a formulação do modelo e suas características.

#### 4.1.3 Formulação Geral

O modelo de seleção de portfólio apresentado pode assumir variadas formulações, a depender das restrições consideradas no problema. De forma generalizada, resume-se a:

$$\begin{aligned} & \max_{p_r \in P} V(p_r) \\ \text{Sujeito a : } & \begin{cases} p_r \cdot C \leq B \\ p_r \cdot R \leq F \\ x_i = 1 & \forall X_i \in S_M \\ \sum_{i=1}^m \left( x_i \sum_{k=1}^n w_k z_{ik} \right) \geq \sum_{i=1}^m x_i \alpha & 0 \leq \alpha \leq 1 \\ x_i - x_j \geq 0 & X_j \text{ dependente de } X_i \\ \sum x_i \leq 1 & X_i \in S_{MC} \\ p_r = [x_1, \dots, x_m]^T & x_i \text{ binário para todo } i = 1, \dots, m \end{cases} \end{aligned} \quad (4.26)$$

Onde  $V(p_r)$  é a função valor do portfólio apresentada na equação (4.13). Ressalta-se, novamente, que o problema pode exigir a elaboração de restrições não abordadas nesta breve descrição, cabendo ao analista de decisão formular a expressão que melhor retrate a exigência imposta.

A utilização de uma função valor aditiva como objetivo é uma forma eficiente de tratar as sinergias como parte do problema, visto que permite que sejam incorporadas ao objetivo juntamente com as avaliações das ações para múltiplos critérios. Conforme demonstrado em Almeida & Duarte (2011), esta configuração permite que a avaliação de sinergias impacte efetivamente sobre a escolha do portfólio.

Contudo, é importante destacar que o uso de uma função valor multicritério implica implicitamente que algumas hipóteses são assumidas para que a estrutura de preferências do decisor possa ser representada por tal função. A mais importante delas é que não haja integração de preferências entre os critérios, ou seja, que estes sejam independentes em preferência. Em termos práticos, a independência em preferência implica a avaliação das ações de acordo com um critério seja realizada sem a necessidade de se referir a outro critério, o que ocorre quando os critérios são bem definidos e não redundantes (ALMEIDA, 2011).

Destaca-se como principais vantagens do modelo os seguintes aspectos:

- Múltiplos critérios são utilizados para compor a avaliação das ações, permitindo incorporar pontos de vista conflitantes, que em conjunto com a avaliação das sinergias constitui o objetivo a ser maximizado no modelo;
- A tradução das escalas individuais para uma escala única de valor através das constantes de escala utilizadas na agregação aditiva permite que aspectos não-monetários sejam incorporados ao modelo, inclusive os qualitativos;
- As inter-relações entre as ações são consideradas, assumindo a forma de sinergias ou de interdependências representadas por restrições;
- A elicitação das preferências do decisor para avaliar ações torna possível incorporar parte de sua experiência e conhecimento ao modelo;
- O modelo fundamenta-se em uma teoria matemática acessível aos decisores, sejam estes gestores de sistemas elétricos ou formuladores de políticas (*policy makers*).

A maior dificuldade de utilização deste modelo reside na elicitação, a qual a depender do número de ações consideradas pode inclusive tornar-se exaustiva e maçante para o entrevistado. Esta dificuldade é potencializada quando a elicitação se destina a obter valores percebidos de sinergias entre ações, devido ao alto grau de subjetividade inerentemente envolvido.

## 4.2 Modelo de Elicitação de Sinergia Individual

Em Almeida & Duarte (2011) não é diretamente abordado o modelo de elicitação utilizado. Tal modelo está implícito na forma como a medida de sinergias é definida. Neste caso, a métrica empregada é o grau de contribuição de uma ação para outra, em valores percentuais da ação que estaria recebendo a contribuição. Em outras palavras, as sinergias são avaliadas através da contribuição individual acrescentada a cada ação pela presença conjunta com cada uma das outras ações do portfólio.

Devido ao caráter de individualização de sinergias observado, optamos por denominar este modelo de “*modelo de elicitação de sinergias individual*”. Neste caso, o especialista entrevistado deve ser capaz de fornecer valores para as sinergias na forma requisitada, o que implica na capacidade de discernir em um grupo de duas ou mais ações as parcelas de sinergia que são proporcionadas por uma ação a outra.

As sinergias são incorporadas à função objetivo aditiva através da soma das parcelas de sinergias ativas no portfólio ( $CS(p_r)$ ), representada pela equação (4.11). Logo,  $CS(p_r)$  representa todas as possíveis sinergias presentes no modelo de elicitação individual. Podemos rearranjar este somatório, agrupando a sinergia entre duas ações  $X_i$  e  $X_j$ , que neste caso é obtida através da soma das parcelas relativas à contribuição de  $X_j$  para  $X_i$  e de  $X_i$  para  $X_j$ . A sinergia entre duas ações  $X_i$  e  $X_j$  no modelo de elicitação individual está representada na equação (4.27).

$$\begin{aligned} S(X_i, X_j) &= x_i x_j s_{ij} v(X_i) + x_j x_i s_{ji} v(X_j) \\ S(X_i, X_j) &= x_i x_j [s_{ij} v(X_i) + s_{ji} v(X_j)] \end{aligned} \quad (4.27)$$

Portanto, o modelo de elicitação individual se propõe a avaliar a sinergia total presente em um portfólio através de pares de ações, mensurando as contribuições sinérgicas de uma ação para outra. É válido salientar que fica subentendido na forma como o modelo é definido que este considera que as sinergias são perfeitamente fragmentadas em parcelas menores, neste caso, as contribuições de uma ação para outra.

Outro aspecto não mencionado em Almeida & Duarte (2011) é a consideração de sinergias negativas entre ações. Apesar de não ser abordado, tanto o modelo de seleção de portfólio quanto o modelo de elicitação suportam este tipo de sinergia, também referenciadas como efeito disfuncional ou canibalismo. Para avaliar sinergias negativas através do modelo de elicitação individual a métrica utilizada é a mesma, porém, o efeito provocado é inverso: deseja-se valorar o decréscimo provocado em uma ação por outra, em valores percentuais da ação que sofre a dedução. Para incorporar este tipo de sinergia ao modelo de seleção de portfólio utiliza-se o sinal negativo, que indica o efeito de abatimento no valor da ação.

O motivo para a omissão das sinergias negativas é a dificuldade verificada na avaliação de sua ocorrência. Sabe-se que avaliar sinergias no contexto de portfólio não é uma tarefa simples e depende fortemente da subjetividade atrelada à percepção do especialista. Verificar sinergias negativas é ainda mais complexo do que avaliar a existência de sinergias positivas. Quando sinergias positivas são observadas, é dada mais força ao argumento de inclusão das ações sinérgicas no portfólio. Por outro lado, no caso das sinergias negativas, é necessária atenção redobrada, pois a sua consideração pode implicar na exclusão das ações envolvidas do portfólio.

Devido à sinergia ser uma característica associada a duas ou mais ações a sua inclusão na função objetivo significa a introdução de não-linearidades. Na prática, para cada par de ações  $X_i$  e  $X_j$  cuja sinergia é elicitada segundo o modelo individual são adicionados dois termos não lineares na função objetivo, os quais correspondem às parcelas da equação (4.27). Como as variáveis do problema são inteiras, mas especificamente binárias, significa que um algoritmo de Programação Não Linear Inteira deve ser utilizado para obter a solução do sistema representado em (4.26). No caso em que não existem sinergias entre as ações consideradas o modelo para seleção de portfólio também é aplicável, e o problema se reduz a otimizar um sistema linear, bem mais simples e cuja solução ótima pode ser encontrada por algoritmos específicos em intervalos de tempo mais razoáveis.

A formalização do modelo de elicitación de sinergia individual abre espaço para a proposição de outros modelos, baseados em métricas diferentes. Contudo, antes de partir para a tarefa de elaboração de modelos, devem-se esclarecer melhor alguns aspectos concernentes à elicitación de sinergias.

### 4.3 Considerações sobre a Elicitación de Sinergias

O modelo anteriormente descrito permite elicitar as sinergias através da identificação da contribuição gerada por uma das ações para outra ação, em termos percentuais do valor da ação beneficiada. Porém, este processo nem sempre é simples e direto: em alguns casos o especialista não consegue distinguir as contribuições individuais de uma ação. Isso ocorre porque um modelo de elicitación de sinergias é influenciado por dois principais aspectos: (1) a estrutura do conjunto de entes cuja sinergia deseja-se avaliar e (2) a forma como o especialista percebe as sinergias existentes no conjunto de entes analisado.

É necessário destacar que a terminologia “entes” foi empregada para enfatizar as particularidades dos elementos considerados para compor um portfólio. Estes elementos podem ser, por exemplo, projetos, programas, bens, estratégias ou ações. As características dos entes que compõe o conjunto considerado e a relação que estabelecem entre si determinam a estrutura das sinergias presentes entre eles. Uma característica relevante é a tangibilidade. Podemos ordenar os entes enunciados em relação à tangibilidade em uma ordem decrescente: bens, projetos/programas, ações, estratégias. Sabe-se que a sinergia é um ganho proporcionado pela interação entre dois ou mais entes. O que se observa em modelos de elicitación de sinergia é que quanto maior a tangibilidade dos entes considerados, mais fácil

será discretizar a sinergia existente entre eles. O modelo de elicitação individual de sinergias foi formulado com base em projetos, o que permite discretizar as sinergias em ganhos proporcionados por um projeto para outro. Este modelo pode enfrentar maiores dificuldades quando aplicado a entes menos tangíveis, por exemplo, ações ou estratégias.

Outro fator que deve ser levado em consideração é a forma como o especialista percebe as sinergias, pois é dele que se deseja extrair as informações. No que tange à discretização, em determinado conjunto de entes o especialista pode ser capaz ou não de discretizar sinergias. Ele pode, por exemplo, ser capaz apenas de identificar sinergias oriundas da interação entre três ou mais entes, entretanto, sem conseguir identificar qual parcela desta sinergia está relacionada a cada par de entes. Em outra situação, o especialista pode ser capaz de perceber, em um dado conjunto de entes, sinergias entre pares, porém sem distinguir qual dos dois entes é responsável por qual parcela da sinergia. No caso extremo, onde se obtém a sinergia da forma mais discreta possível, o especialista deve ser capaz de identificar sinergia entre pares, determinando qual parcela cabe a cada um dos entes. Quanto menor a capacidade do especialista de discretizar sinergias em um conjunto de entes, mais subjetivo será o processo de elicitação e menos informação será obtida.

A definição do processo de elicitação a ser utilizado implica na ocorrência de um *trade-off* entre os pontos de vista do analista e do especialista. Para o analista o ideal é obter o máximo de informação possível, o que requer um questionário minucioso, que por vezes pode ser exaustivo. Por outro lado, o especialista não deseja comprometer seu tempo com perguntas excessivas e gostaria que o processo fosse simples. Há, portanto, que se obter um compromisso entre a quantidade de informação requerida e a quantidade de perguntas feitas ao especialista. Cabe ao analista, ciente da situação, elaborar um processo claro e conciso o suficiente para que o especialista entenda o que se quer elicitar e seja capaz de fornecer informações ao nível de detalhe requisitado.

A decisão de incorporar sinergias em um modelo de seleção de portfólio não é tomada ao acaso e precisa, portanto, ser justificada. Cabe ao decisor, auxiliado ou não por um facilitador, identificar a presença de sinergias entre os elementos considerados para compor o portfólio durante a etapa de estruturação do problema. Porém, apenas identificar a existência de sinergias não é suficiente para incorporá-las ao modelo. O analista precisa avaliar juntamente com o decisor se as sinergias são significativas, isto é, se os valores adicionados ao portfólio decorrente da interação entre seus elementos influenciam na tomada de decisão.



Satisfeita estas etapas, o analista vê-se diante de duas questões: como obter os valores das sinergias e como incorporá-las ao modelo. Estas questões são abordadas durante a construção do modelo. A primeira questão diz respeito à elicitação e, conforme explicação anterior, deve considerar a estrutura dos elementos considerados para compor o portfólio e a percepção do especialista. Por fim, cabe ao analista identificar a forma adequada de incorporar as sinergias no modelo. Assim como a elicitação de sinergias, a sua incorporação ao modelo também é alvo de estudos ainda incipientes. Algumas formas encontradas na literatura são:

- A consideração da sinergia como um indicador avaliado antes ou após a aplicação do modelo de decisão (*e.g.* GOLABI *et al.*, 1981);
- Incorporar a sinergia em um modelo de otimização através de restrições (*e.g.* HALL *et al.*, 1992);
- Incluir sinergias em um modelo de otimização através da função objetivo (*e.g.* ALMEIDA & DUARTE, 2011);
- Utilizar heurísticas para avaliar portfólios considerando sinergias (*e.g.* DOERNER *et al.*, 2006).

O uso da sinergia como um indicador avaliado antes da aplicação de um modelo de decisão permite apenas direcionar o espaço de soluções para grupos de alternativas com maior sinergia. Quando utilizado após, pode servir como critério de desempate. Porém, em nenhum dos dois casos as sinergias são consideradas durante a seleção do portfólio e servem apenas para fomentar análises subjetivas e não sistemáticas.

Ao utilizar as sinergias para gerar restrições em um modelo de otimização pode-se garantir que o portfólio atenda condições de sinergia, por exemplo, que um valor mínimo de sinergia seja satisfeito. Neste caso, novamente não é levado em conta as possíveis configurações de sinergia para tomar a decisão. Por outro lado, ao considerar as sinergias parte de uma função objetivo, ou no caso multiobjetivo como uma das funções objetivo, elas passam a influenciar diretamente a tomada de decisão, juntamente com outros objetivos relevantes.

O fato de a sinergia ser uma característica mensurável para grupos de duas ou mais alternativas implica na impossibilidade de avaliar esta interação de modo semelhante a um critério relacionado a ações. A sinergia é uma propriedade relacionada ao portfólio e só pode ser mensurada como tal. A avaliação sobre portfólio motiva a utilização de heurísticas para

resolver o problema. Contudo, é necessário lembrar que neste tipo de aplicação se está susceptível ao grande número de portfólios possíveis decorrente da explosão combinatória.

A elicitação de sinergias individual permite fragmentar sinergias em parcelas menores, as quais são somadas para compor a sinergia de um conjunto quando o portfólio é formado. Isso possibilita considerar as sinergias e avaliações individuais de ações em relação a critérios simultaneamente em uma função objetivo multicritério a ser otimizada. Além de ser uma forma eficiente de tornar as sinergias parte da decisão permite que algoritmos de otimização, os quais são amplamente difundidos e implementados, sejam aplicados no cálculo da solução do sistema obtido.

No próximo item é desenvolvido um novo modelo de elicitação de sinergias, baseado em um relaxamento da discretização de sinergias do modelo individual, o qual pode ser utilizado em substituição à elicitação individual para determinar os dados de entrada de sinergia para o modelo de seleção de portfólio proposto em Almeida & Duarte (2011).

#### 4.4 Modelo de Elicitação de Sinergia aos Pares

Quando o modelo de elicitação de sinergia individual não for aplicável, seja devido à estrutura das ações ou à percepção do especialista, uma estratégia possível é considerar a elicitação que forneça informações um nível menos discretas do que a elicitação individual. Tal modelo de elicitação estaria baseado em sinergias para pares de ações, contudo sem o discernimento da contribuição que cabe a cada ação do par. Denominamos este modelo de “modelo de elicitação de sinergia aos pares”.

Seja  $X$  um conjunto de  $m$  ações, tal que  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_m\}$ , cuja avaliação é realizada acerca de  $n$  critérios, resultando em *scores* da ação  $X_i$  em relação ao critério  $k$ , que são representados em uma matriz de *scores* similar a (4.2). Considerando um vetor de constantes de escala para os  $k$  critérios como em (4.3) o valor de uma ação é obtido através da equação (4.4). Portanto, representando um portfólio através de um vetor de variáveis binárias tal qual (4.5) a parcela relativa à avaliação de ações é obtida exatamente como em Almeida & Duarte (2011), através de uma função valor aditiva, e pode ser representada por (4.7).

Na elicitação aos pares a sinergia presente no portfólio é mensurada através da contribuição (ou decréscimo, no caso da sinergia negativa) que incide sobre um par de ações em decorrência de sua presença conjunta no portfólio. Portanto, ao somar estas parcelas para obter a sinergia total do portfólio o resultado estará baseado em pares de ações. Isto implica

em assumir que as sinergias são perfeitamente fragmentadas em parcelas menores, à semelhança do modelo individual. Contudo, cabe neste momento formalizar esta hipótese e fundamentá-la, o que é feito a seguir.

*Hipótese de Fragmentação de sinergias: As sinergias decorrentes da interação entre três ou mais ações são perfeitamente fragmentadas em sinergias entre pares de ações.*

Na prática, se quisermos fragmentar a sinergia existente para um conjunto de  $m$  ações devemos considerar as interações sinérgicas para todos os subconjuntos com mais de um elemento. Por exemplo, para um conjunto de três ações  $(A,B,C)$ , a fragmentação da sinergia entre elas deveria ser composta por parcelas relativas à interação  $(A,B)$ ,  $(A,C)$ ,  $(C,A)$  e uma parcela relativa à interação  $(A,B,C)$ . Isto permite incorporar efeitos de sinergia que só ocorrem quando as três ações fazem parte do portfólio. Este conceito é apresentado para o caso de três ações na figura 4.1.



Figura 4.1 – Fragmentação de sinergias para três ações

Porém, à medida que aumenta o número de ações em um subconjunto do conjunto cuja sinergia deseja-se avaliar há uma diminuição no valor da parcela relativa ao efeito adicionado pela interação entre as ações do subconjunto. O que significa que a parcela acrescentada devido à presença de três ações será menor do que a parcela acrescentada pela interação entre pares de ações; para quatro ações a parcela acrescentada será menor do que para três ações, e assim sucessivamente. Desse modo, a hipótese assumida implica em considerar as parcelas adicionais de sinergia acrescentadas por interações entre três ou mais ações desprezíveis. Tal hipótese é razoavelmente aceitável e permite uma simplificação essencial na definição de uma medida de sinergia. A figura 4.2 ilustra esta simplificação para três ações.

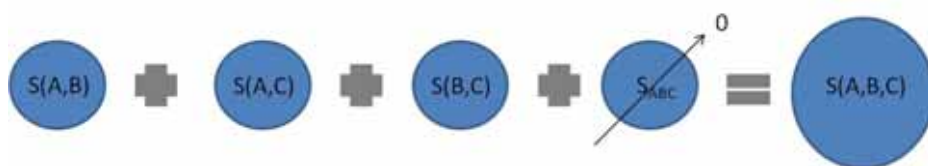


Figura 4.2 – Hipótese simplificadora de fragmentação para três ações

Esclarecida a hipótese simplificadora, é possível formalizar o modelo de elicitación aos pares. Seja  $S'_{ij} = [s'_{ij}]$  a matriz de sinergia obtida através da elicitación aos pares, cujos elementos  $s'_{ij}$  são definidos como o valor percentual sobre a soma dos valores de avaliação das ações  $X_i$  e  $X_j$  acrescentado ao portfólio em consequência da interação sinérgica entre as duas ações. A matriz de sinergia aos pares é apresentada em (4.28).

$$S'_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & s'_{12} & s'_{13} & s'_{14} & \dots & s'_{1m} \\ 0 & 0 & s'_{23} & s'_{24} & \dots & s'_{2m} \\ 0 & 0 & 0 & s'_{34} & \dots & s'_{3m} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s'_{m-1,m} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

A matriz  $S'_{ij}$  é uma matriz triangular superior cuja diagonal é nula. Significa que os elementos no triângulo inferior são nulos, pois ao tomarmos a sinergia para o par  $(X_i, X_j)$  automaticamente está se avaliando a sinergia para  $(X_j, X_i)$ , não sendo necessário mensurar o elemento simétrico a  $s'_{ij}$  na matriz de sinergia aos pares. Para que fique mais claro, podemos dizer que no modelo de elicitación individual estávamos lidando com arranjos de  $m$  ações duas a duas, onde a ordem dos elementos é relevante, pois eram avaliadas as contribuições de  $X_i$  para  $X_j$  e de  $X_j$  para  $X_i$  separadamente, enquanto no modelo de elicitación aos pares trabalha-se com a combinação de  $m$  ações duas a duas, onde a ordem das ações não é importante, e, portanto, a sinergia é avaliada para o par de ações. Assim como na elicitación individual a diagonal principal é nula no modelo aos pares, pois não é possível ocorrer interação sinérgica de uma ação com ela mesma.

Isso posto, a matriz de sinergia aos pares fica assim definida:

$$S'_{ij} = [s'_{ij}] \text{ onde } s'_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{para } i \geq j \\ 0 \leq s'_{ij} \leq 1 & \text{para } i < j \end{cases} \quad (4.29)$$

Com base na notação do modelo de seleção de portfólio de Almeida & Duarte (2011) para avaliar ações, conforme previamente explicado, e utilizando o novo conceito de

elicitação de sinergia aos pares podemos construir a equação que estabelece a sinergia entre duas ações  $X_i$  e  $X_j$ :

$$S'(X_i, X_j) = x_i x_j s'_{ij} [v(X_i) + v(X_j)] \quad (4.30)$$

De modo que as sinergias entre as ações  $X_i$  e  $X_j$  são a contribuição acrescentada a cada par de ações pela sua presença conjunta no portfólio. Conforme definido,  $s'_{ij}$  é obtido sobre a soma dos valores das ações cuja sinergia é avaliada. Esta forma requer um raciocínio menos fragmentado sobre os valores de sinergia do que a elicitação individual.

Portanto, a função objetivo do modelo de seleção de portfólio com elicitação de sinergia aos pares terá a seguinte forma:

$$V'(p_r) = \sum_{i=1}^m \left( x_i \sum_{k=1}^n w_k z_{ik} \right) + \sum_i \sum_j S'(X_i, X_j) \quad (4.31)$$

Onde  $\sum_i \sum_j S'(X_i, X_j)$  representa a parcela relativa à avaliação de sinergias com base na medida de sinergia aos pares conforme (4.30). Iremos desenvolver este termo para obter um somatório em função das variáveis de decisão condizente com a estrutura da matriz de sinergia  $S'_{ij}$ .

Primeiramente escrevemos  $\sum_i \sum_j S'(X_i, X_j)$  na forma extensa, explicitando seus termos:

$$\begin{aligned} \sum_i \sum_j S'(X_i, X_j) = & x_1 x_2 s'_{12} [v(X_1) + v(X_2)] + \dots + x_1 x_{m-1} s'_{1m-1} [v(X_1) + v(X_{m-1})] + \\ & + x_1 x_m s'_{1m} [v(X_1) + v(X_m)] + x_2 x_3 s'_{23} [v(X_2) + v(X_3)] + \dots + \\ & + x_2 x_{m-1} s'_{2m-1} [v(X_2) + v(X_{m-1})] + x_2 x_m s'_{2m} [v(X_2) + v(X_m)] + \\ & + \dots + x_{m-1} x_m s'_{m-1m} [v(X_{m-1}) + v(X_m)] \end{aligned} \quad (4.32)$$

A forma extensa permite esclarecer os índices do duplo somatório que se deseja obter. Logo, somar as sinergias para pares de ações equivale a:

$$\sum_i \sum_j S'(X_i, X_j) = \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m \{ x_i x_j s'_{ij} [v(X_i) + v(X_j)] \} \quad (4.33)$$

Finalmente, substituindo  $\sum_i \sum_j S'(X_i, X_j)$  na função objetivo (4.31), temos que para o modelo de elicitação aos pares a função valor global do portfólio é dada por:

$$V'(p_r) = \sum_{i=1}^m \left( x_i \sum_{k=1}^n w_k z_{ik} \right) + \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m \{ x_i x_j s'_{ij} [v(X_i) + v(X_j)] \} \quad (4.34)$$

A formulação deste novo modelo permite que algumas comparações sejam feitas em relação ao modelo individual e, conseqüentemente, resultados podem ser obtidos destas comparações. A seguir são enunciados os principais resultados.

#### 4.4.1 Resultados decorrentes da formulação dos modelos

Suponha a sinergia que se deseja mensurar seja única para cada especialista e para cada combinação de ações, isto é, para cada portfólio os valores das sinergias percebidos pelo especialista independem da forma de elicitação adotada. Esta suposição será denominada Postulado da Unicidade de Sinergias.

*Postulado da Unicidade de Sinergias: O valor de sinergia percebido por um especialista para uma combinação de ações independe do modelo de elicitação adotado.*

A proposição deste postulado permite enunciar o teorema seguinte para comparação dos modelos de elicitação de sinergia individual e aos pares.

*Teorema 1: Seja  $p_r \in P$  um portfólio em um conjunto de portfólios  $P$ . Se para todo  $p_r \in P$  o postulado da unicidade de sinergias é verdadeiro, então os modelos de elicitação individual e aos pares são equivalentes.*

*Demonstração do Teorema 1:*

Supondo o postulado da unicidade verdadeiro para todo  $p_r \in P$ , a sinergia resultante mensurada para um portfólio através dos dois modelos deve ser igual. Logo:

$$\sum_{i=1}^m \left( x_i V(X_i) \sum_{j=1}^m (x_j s_{ij}) \right) = \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m \{ x_i x_j s'_{ij} [v(X_i) + v(X_j)] \} \quad (4.35)$$

Sabe-se que a função objetivo do modelo com elicitação individual é dada pela equação (4.13) transcrita a seguir:

$$V(p_r) = \sum_{i=1}^m \left( x_i \sum_{k=1}^n w_k z_{ik} \right) + \sum_{i=1}^m \left( x_i v(X_i) \sum_{j=1}^m (x_j s_{ij}) \right) \quad (4.13)$$

Ao substituir o somatório referente às sinergias em (4.13) por (4.35) temos:

$$V(p_r) = \sum_{i=1}^m \left( x_i \sum_{k=1}^n w_k z_{ik} \right) + \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m (x_i x_j s'_{ij} [v(X_i) + v(X_j)]) \quad (4.36)$$

$$\therefore V(p_r) = V'(p_r) \quad (4.37)$$

O que conclui a demonstração do teorema ■

Portanto, satisfeita a hipótese, os dois modelos desejam maximizar funções objetivo equivalentes. A diferença entre os modelos reside na forma das perguntas feitas para extrair as informações do especialista entrevistado. Por isso é importante observar a importância da sensibilidade da percepção do decisor às perguntas do modelo de eliciação, para que se utilize o modelo mais adequado.

Decorrem imediatamente do Teorema 1 os corolários enunciados a seguir.

*Corolário 1: Se os modelos de eliciação individual e aos pares são equivalentes, então  $s'_{ij}$  é uma função de  $s_{ij}$  e  $s_{ji}$  para todo  $i$  diferente de  $j$ .*

*Corolário 2: O modelo de eliciação individual exige o dobro dos dados requeridos pelo modelo de eliciação aos pares para obter a mesma informação de sinergia.*

*Demonstração do Corolário 1:*

Sabemos que para os modelos serem equivalentes a hipótese do teorema 1 deve ser satisfeita, o que implica na sinergia resultante dos modelos ser igual, conforme estabelecido por (4.35).

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (x_i x_j s_{ij} v(X_i)) = \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m (x_i x_j s'_{ij} [v(X_i) + v(X_j)]) \quad (4.35)$$

Colocando o somatório do lado esquerdo da equação (4.35) na forma extensiva, obtemos:

$$\begin{aligned}
\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (x_i x_j s_{ij} v(X_i)) &= x_1 x_1 s_{11} v(X_1) + x_1 x_2 s_{12} v(X_1) + \dots + x_1 x_{m-1} s_{1m-1} v(X_1) + \\
&+ x_1 x_m s_{1m} v(X_1) + x_2 x_1 s_{21} v(X_2) + x_2 x_2 s_{22} v(X_2) + \dots + \\
&+ x_2 x_{m-1} s_{2m-1} v(X_2) + x_2 x_m s_{2m} v(X_2) + \dots + x_{m-1} x_1 s_{m-11} v(X_{m-1}) + \\
&+ x_{m-1} x_2 s_{m-12} v(X_{m-1}) + \dots + x_{m-1} x_{m-1} s_{m-1m-1} v(X_{m-1}) + \\
&+ x_{m-1} x_m s_{m-1m} v(X_{m-1}) + x_m x_1 s_{m1} v(X_m) + x_m x_2 s_{m2} v(X_m) + \dots + \\
&+ x_m x_{m-1} s_{mm-1} v(X_m) + x_m x_m s_{mm} v(X_m)
\end{aligned} \tag{4.38}$$

Sabe-se que  $s_{ij} = 0$  para  $i = j$ . Substituindo  $s_{ij} = 0$  para  $i = j$  na equação (4.38) e reagrupando os termos de forma a obter as sinergias entre pares de ações, temos:

$$\begin{aligned}
\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (x_i x_j s_{ij} v(X_i)) &= x_1 x_2 [s_{12} v(X_1) + s_{21} v(X_2)] + x_1 x_3 [s_{13} v(X_1) + s_{31} v(X_3)] + \dots + \\
&+ x_1 x_m [s_{1m} v(X_1) + s_{m1} v(X_m)] + x_2 x_3 [s_{23} v(X_2) + s_{32} v(X_3)] + \\
&+ x_2 x_4 [s_{24} v(X_2) + s_{42} v(X_4)] + \dots + x_2 x_m [s_{2m} v(X_2) + s_{m2} v(X_m)] + \\
&+ \dots + x_{m-1} x_m [s_{m-1m} v(X_{m-1}) + s_{mm-1} v(X_m)]
\end{aligned} \tag{4.39}$$

Tomamos o somatório em  $j$  para cada  $i$  variando de 1 a  $(m-1)$ :

$$\begin{aligned}
\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (x_i x_j s_{ij} v(X_i)) &= \sum_{j=2}^m [x_1 x_j (s_{1j} v(X_1) + s_{j1} v(X_j))] + \sum_{j=3}^m [x_2 x_j (s_{2j} v(X_2) + s_{j2} v(X_j))] + \dots + \\
&+ \sum_{j=m-1}^m [x_{m-2} x_j (s_{m-2j} v(X_{m-2}) + s_{jm-2} v(X_j))] + \\
&+ x_{m-1} x_m (s_{m-1m} v(X_{m-1}) + s_{mm-1} v(X_m))
\end{aligned} \tag{4.40}$$

Que agrupado agora para o somatório em  $i$  torna-se:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (x_i x_j s_{ij} v(X_i)) = \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m [x_i x_j (s_{ij} v(X_i) + s_{ji} v(X_j))] \tag{4.41}$$

Substituindo (4.41) na equação (4.35):

$$\sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m [x_i x_j (s_{ij} v(X_i) + s_{ji} v(X_j))] = \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m [x_i x_j s'_{ij} (v(X_i) + v(X_j))] \tag{4.42}$$



O que implica em que para cada  $i \neq j$ :

$$\begin{aligned} x_i x_j [s_{ij} v(X_i) + s_{ji} v(X_j)] &= x_i x_j s'_{ij} [v(X_i) + v(X_j)] \\ [s_{ij} v(X_i) + s_{ji} v(X_j)] &= s'_{ij} [v(X_i) + v(X_j)] \\ s'_{ij} &= \frac{s_{ij} v(X_i) + s_{ji} v(X_j)}{v(X_i) + v(X_j)} \end{aligned} \quad (4.43)$$

O que conclui a demonstração ■

Portanto, se, e somente se, o postulado da unicidade de sinergias for verdadeiro, os modelos de elicitação individual e aos pares são equivalentes e a relação

$$s'_{ij} = \frac{s_{ij} v(X_i) + s_{ji} v(X_j)}{v(X_i) + v(X_j)}$$

é válida para todo  $i$  diferente de  $j$ . Ou seja, se a sinergia presente no

portfólio independe da forma de elicitação adotada, então para todo par de ações  $(X_i, X_j)$ ,  $X_i \neq X_j$ , a sinergia agregada para duas ações é uma função das sinergias individuais relacionadas às mesmas ações. Mais precisamente, a sinergia agregada se comporta como uma ponderação das sinergias individuais baseada no valor relativo entre as ações.

*Demonstração do Corolário 2:*

Se a hipótese do teorema 1 é satisfeita os modelos de elicitação individual e aos pares são considerados equivalentes e conseqüentemente fornecem os mesmos valores de sinergia para cada portfólio formado pelas ações consideradas.

Portanto, a informação que se deseja obter através dos dois modelos de elicitação abordados está relacionada à sinergia existente entre as ações que compõem cada um dos portfólios considerados para seleção. Esta informação é fragmentada em valores de sinergia de uma ação para outra no modelo de elicitação individual e em valores de sinergia para cada par de ações no modelo de elicitação aos pares.

No modelo de elicitação individual os dados utilizados para obter a informação de sinergia são os valores de  $s_{ij}$ . Não existem valores de  $s_{ij}$  para  $i = j$ , pois não é possível uma ação interagir sinergicamente com ela mesma. Portanto, não serão contabilizados os  $s_{ij}$  quando  $i = j$ . A ordem das ações importa, pois  $s_{ij} \neq s_{ji}$  e os dois devem ser contabilizados.

Logo, o número de elementos  $s_{ij}$  requisitados pelo modelo de elicitação individual é obtido através do arranjo das  $m$  ações duas a duas, conforme estabelecido pela equação (4.44).

$$\#s_{ij} = A(m,2) = \frac{m!}{(m-2)!} \quad (4.44)$$

Desenvolvendo a equação (4.44) obtemos que o número de  $s_{ij}$  requerido no modelo de elicitação individual é dado por (4.45).

$$\begin{aligned} \#s_{ij} &= m(m-1) \\ \#s_{ij} &= m^2 - m \end{aligned} \quad (4.45)$$

No modelo de elicitação aos pares os dados utilizados para obter a informação de sinergia dizem respeito aos valores de  $s'_{ij}$ . Pela mesma razão do modelo individual, não são contabilizados os  $s'_{ij}$  quando  $i = j$ . Neste caso a ordem das ações não importa, pois ao obter  $s'_{ij}$  já se tem informação de sinergia para o par, não sendo necessário contabilizar  $s'_{ji}$ . Por conseguinte, o número de elementos  $s'_{ij}$  requisitados pelo modelo de elicitação aos pares pode ser obtido através da combinação das  $m$  ações duas a duas, conforme mostrado em (4.46).

$$\#s'_{ij} = C(m,2) = \frac{m!}{2!(m-2)!} \quad (4.46)$$

Desenvolvendo (4.46) obtemos o número de  $s'_{ij}$  requerido no modelo de elicitação aos pares:

$$\begin{aligned} \#s'_{ij} &= \frac{m(m-1)}{2} \\ \#s'_{ij} &= \frac{m^2 - m}{2} \end{aligned} \quad (4.47)$$

Comparando a quantidade de dados requisitados pelos dois modelos, ou seja, (4.45) e (4.47), temos:

$$\begin{aligned} \frac{\#s_{ij}}{\#s'_{ij}} &= \frac{m^2 - m}{\frac{m^2 - m}{2}} \\ \frac{\#s_{ij}}{2} &= \#s'_{ij} \end{aligned} \quad (4.48)$$

$$\#s_{ij} = 2\#s'_{ij} \quad (4.49)$$

O que conclui a demonstração ■

A partir de (4.49) pode-se afirmar que o número de elementos  $s_{ij}$  requerido pelo modelo de elicitação individual equivale ao dobro do número de elementos  $s'_{ij}$  requisitado pelo modelo de elicitação aos pares, o que significa que o modelo individual requer o dobro de dados para obter a mesma informação de sinergia final, relacionada ao portfólio.

O corolário 2 comprova matematicamente o *trade-off* decorrente da discretização de sinergias. Conforme este corolário, o modelo de elicitação individual exige mais dados, o que por um lado implica em mais perguntas feitas ao especialista, tomando mais tempo para realização da elicitação. Por outro lado, a maior discretização dos dados presente no modelo individual fornece um maior nível de detalhe acerca das sinergias. No modelo aos pares menos dados são exigidos, o que se reflete em um questionário de elicitação mais sucinto, contudo, há uma perda relativa de informação ao se utilizar dados menos discretos. Devem-se analisar cuidadosamente estes aspectos quando se tem que optar por um dos dois modelos.

Pode-se verificar o corolário 2 através da análise direta das matrizes de sinergia dos dois modelos. Sejam as matrizes de sinergia do modelo de elicitação individual (4.8) e do modelo de elicitação aos pares (4.28):

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} s_{11} & \cdots & s_{1m} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ s_{m1} & \cdots & s_{mm} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

$$S'_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & s'_{12} & s'_{13} & s'_{14} & \cdots & s'_{1m} \\ 0 & 0 & s'_{23} & s'_{24} & \cdots & s'_{2m} \\ 0 & 0 & 0 & s'_{34} & \cdots & s'_{3m} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s'_{m-1,m} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

Com o intuito de facilitar a comparação, expandimos os termos da matriz (4.8) e substituímos os valores nulos de  $s_{ij}$  para  $i = j$ , os quais não são passíveis de elicitação:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & s_{12} & s_{13} & s_{14} & \dots & s_{1m} \\ s_{21} & 0 & s_{23} & s_{24} & \dots & s_{2m} \\ s_{31} & s_{32} & 0 & s_{34} & \dots & s_{3m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 & \ddots & \vdots \\ s_{m-11} & s_{m-12} & \dots & s_{m-1m-2} & \ddots & s_{m-1m} \\ s_{m1} & s_{m2} & s_{m3} & \dots & s_{mm-1} & 0 \end{bmatrix} \quad (4.50)$$

A inspeção das matrizes permite observar que ambas por definição apresentam a diagonal principal nula, o que significa que independente da avaliação do especialista estes elementos assumem o valor zero e, portanto, não precisam ser elicitados. A matriz (4.28) também apresenta o triângulo inferior nulo por definição, logo estes elementos da matriz não farão parte do questionário de elicitação do modelo aos pares. Por outro lado, o modelo individual elicita valores que fazem parte dos triângulos inferior e superior da matriz  $S_{ij}$ . Por definição uma matriz de sinergia é uma matriz quadrada. A diagonal principal de uma matriz quadrada possui a propriedade de dividir os elementos da matriz em duas configurações triangulares, de modo que para cada elemento acima da diagonal principal há outro elemento em posição simétrica abaixo desta diagonal. Portanto, o número de elementos acima da diagonal principal é igual ao número de elementos abaixo desta. Conseqüentemente, ao elicitar valores apenas para os elementos acima da diagonal principal o modelo aos pares obtém exatamente metade dos valores elicitados no modelo individual, que considera os elementos acima e abaixo da diagonal principal de uma matriz de sinergia.

Os resultados apresentados são conclusões robustas extraídas da comparação dos modelos de elicitação de sinergia. De posse deles pode-se tomar uma decisão mais fundamentada em relação a qual dos dois métodos é mais adequado para determinada situação ou ainda checar a consistência de questionários de elicitação aplicados com base em um dos modelos através de perguntas formuladas com base no outro modelo.

Na próxima seção é apresentada uma aplicação do modelo de seleção de portfólio utilizando a elicitação de sinergia aos pares no contexto de políticas energéticas sustentáveis.

#### 4.5 Aplicação do Modelo de Elicitação aos Pares

Sabe-se que as políticas são um importante impulsionador para a sustentabilidade energética. Atualmente existe um vasto conjunto de medidas políticas que são implantadas para este fim em vários países. Apesar do grande número de possibilidades a elaboração de

um portfólio político baseado em conjunto de medidas não é uma tarefa fácil, pois se deve considerar a forma como as medidas interagem para compor um portfólio bem estruturado, que permita um melhor direcionamento para o objetivo final: a sustentabilidade. Medidas políticas são por vezes complementares ou sinérgicas, no sentido que o resultado da adoção de uma medida pode ser impulsionado pela adoção de outra.

Diante deste contexto, se propõe a utilização de um modelo para selecionar um portfólio de políticas energéticas sustentáveis que permita considerar sinergias. O modelo de seleção abordado anteriormente utilizando a proposta de elicitação aos pares é uma opção viável, considerando-se que o problema permita tal nível de discretização e que o especialista entrevistado sinta-se confortável para avaliar sinergias desta forma.

Este tópico se destina a realizar uma aplicação do modelo de elicitação de sinergias aos pares ao problema de seleção de portfólio de programas políticos em energia sustentável. Infelizmente, existe uma significativa escassez de dados relativos a avaliações quantitativas de políticas, portanto, optou-se por utilizar critérios qualitativos. Além disso, o estudo acerca de sinergias entre políticas ainda é incipiente, o que dificulta uma avaliação mais criteriosa destas.

O problema que iremos considerar consiste na elaboração do portfólio de políticas energéticas de um determinado país, com base em medidas políticas. As medidas possíveis consideradas são quinze ao todo, descritas a seguir:

- Sistema de Licitações Competitivas (SLC): é um sistema de licitação pelo qual os contratos para construir e operar projetos específicos ou quantidades fixas de capacidade renovável são concedidos. Licitações para capacidade de energia renovável podem ser feitas no âmbito nacional ou sub-nacional. Através do incentivo à concorrência entre as empresas de energia o objetivo do sistema de licitação é reduzir o preço do fornecimento de energia renováveis;
- Tarifa-prêmio (FIT): mas conhecida pelo termo em inglês *feed-in tariff*, é uma política que estabelece um preço que é garantido ao longo de um determinado período de tempo em que os produtores de energia podem vender a eletricidade gerada por fontes renováveis;
- Crédito à Produção (TCP): é implementado como um crédito de imposto que estimula a produção de níveis significativos de eletricidade a partir de novas fontes renováveis de energia. Este mecanismo obriga o Tesouro a aceitar créditos fiscais de produção, obtidos por proprietários das empresas de projetos de energia renovável para cada unidade de produção

exportada para o sistema de transmissão, o que pode ser usado para reduzir a obrigação de impostos federais dos proprietários no ano de produção, ou para ser usado para cumprir obrigações tributárias futuras em até 20 anos;

- Isenção de taxas sobre a Produção (ITProd): consiste uma redução ou eliminação dos impostos sobre a produção normalmente exigidos das empresas de energia por parte dos governos estadual e federal. Para ser isenta de impostos, uma empresa deve atender a certos critérios de produção de energia renovável ou de eficiência especificamente definidos. Permite promover economicamente o setor de produção de energia renovável e a redução de perdas na geração;
- Obrigação de Renováveis (RPS): consiste em uma norma que exige que um percentual mínimo da geração vendida ou da capacidade instalada seja fornecido por energia renovável. As empresas de energia são obrigadas a garantir que o objetivo seja alcançado;
- Créditos Negociáveis de Energia Renovável (CNER): são certificados que fornecem ferramentas para cumprimento de obrigações e negociação de energias renováveis entre os consumidores e produtores, e também um meio para compras voluntárias de energia renovável. Operam através da oferta de "certificados verdes" para cada KWh ou MWh gerado por um produtor renováveis. O valor desses certificados, que podem ser negociados em um mercado, é adicionado ao pagamento base da eletricidade renovável gerada;
- Taxas de Carbono (TCO<sub>2</sub>): é um imposto ambiental que incide sobre o conteúdo de carbono dos combustíveis. Consiste em uma forma de precificação do carbono. Um imposto sobre o carbono pode ser implementado através da tributação da queima de combustíveis fósseis – carvão, produtos do petróleo, como gasolina e combustível de aviação, e gás natural – proporcional ao seu teor de carbono. Taxas de carbono são uma das medidas políticas que podem ser usadas para reduzir as emissões de gases de efeito estufa dos combustíveis fósseis;
- Negociação de Emissões (NegE): é uma abordagem baseada no mercado usada para controlar a emissão de carbono através de incentivos econômicos. Um organismo oficial munido de autoridade para emitir créditos concede um número de créditos negociáveis para a geradora de energia renovável quando determinada quantidade de eletricidade gerada é usada ou atinge a rede elétrica. A geradora recebe o pagamento pela entrega da energia do fornecedor a quem a energia foi vendida. Ele também pode vender o crédito ao mesmo fornecedor ou a outro órgão que pretenda adquirir o benefício renovável da energia vendida voluntariamente ou para cumprir uma obrigação imposta de renováveis;

- Dedução de Impostos (DImp): refere-se a uma isenção monetária específica destinados a empresas entrantes no mercado de novas tecnologias em energia renovável para reduzir o lucro tributável. A isenção de taxas pode proporcionar ao contribuinte a liberação completa do imposto, uma taxa reduzida, ou taxar apenas uma parte dos itens sujeitos ao imposto;
- Subsídios Diretos (SDirC): apoio financeiro que permite o desenvolvimento de projetos de infra-estrutura através do uso de benefícios públicos, fundos, empréstimos, bem como outras opções de financiamento. Estas várias opções de financiamento fornecem um meio para alocar o capital necessário para a implementação de projetos de energia renovável;
- Padrões Técnicos e Certificações (PTec): visa estabelecer rotulagens e padrões de eficiência obrigatórios ou certificáveis para geração de energia elétrica, podendo ter foco sobre os renováveis ou ser abrangente, envolvendo as fontes não renováveis;
- Informação e Educação (I&E): consiste na elaboração de campanhas informativas e educativas visando o consumo consciente de energia e uso de energia renovável. Visa reduzir o consumo e perdas do lado da demanda;
- Capacitação e Geração de Mão-de-obra Verde (MDO): elaboração de programas governamentais para qualificação de mão-de-obra técnica em operação de plantas geradoras de energia renovável. A qualificação pode ser direcionada para um tipo específico de tecnologia de geração renovável ou para um grupo de tecnologias de interesse. Esta medida favorece os investimentos em tecnologias renováveis e permite a geração de empregos;
- Melhoria do Processo de Planejamento (Plan): envolve as ações relacionadas ao aperfeiçoamento do processo de planejamento dos programas políticos energéticos relacionados a eficiência energética e energia sustentável, através da revisão de métodos, modelos, revisão do contexto, atualização de dados e inclusão de novas perspectivas;
- Fomento à Pesquisa e Desenvolvimento (P&D): consiste no incentivo à realização de pesquisas relacionadas a fontes de energia renováveis para fins energéticos. Pode ser viabilizado através da criação de institutos de pesquisa governamentais para este fim ou da criação de fundos setoriais para o financiamento de pesquisas realizadas por entidades privadas na área.

Foram utilizados nove critérios em escalas qualitativas para avaliar as medidas consideradas. Estes critérios têm por objetivo captar as diferentes dimensões que devem ser consideradas no problema: social, tecnológica, ambiental e econômica. Os critérios de C3 a

C9 baseiam-se nos critérios propostos por Komor & Bazilian (2005) para avaliar instrumentos políticos.

- Flexibilidade (C1): representa a capacidade de adequação da medida a diferentes contextos. A flexibilidade de uma medida pode ser de interesse quando algumas condições ainda não são claras no momento da implementação da medida. Pode ser necessária também para adaptações setoriais ou regionais, ou quando outras medidas de apoio são implementadas no futuro. É avaliado em uma escala de dez níveis de zero a um, onde zero representaria uma medida totalmente inflexível e um a flexibilidade máxima;
- Risco (C2): avalia a possibilidade de fracasso da medida, seja por inadequação ao contexto do país ou por incertezas inerentes a sua definição. É avaliado em uma escala de cinco níveis de zero a um, onde o maior risco está associado ao zero e o menor ao um, por questão de simplificação para o cálculo;
- Grau de impacto sobre a estabilidade do preço da energia (C3): mede a influência sobre o preço da energia, em decorrências de volatilidade de preços e altos custos de geração. É avaliado em uma escala de cinco níveis de zero a um, onde zero representa a influência menos favorável a estabilidade e um a mais favorável;
- Grau de impacto sobre a redução do preço da energia (C4): avalia o impacto da medida sobre reduções no preço de energia. É mensurado em uma escala de cinco níveis de zero a um, onde zero representa o menor impacto e um o maior;
- Grau de impacto sobre a segurança de suprimento (C5): avalia a contribuição da medida para evitar a escassez de oferta de energia. É mensurado em uma escala de cinco níveis de zero a um, onde zero representa a menor contribuição e um a maior;
- Grau de impacto sobre a redução de emissões (C6): mede a contribuição da política para reduzir emissões de gases do efeito estufa. É avaliado em uma escala de cinco níveis de zero a um, onde zero representa a menor contribuição e um a maior;
- Grau de impacto sobre a sustentabilidade (C7): avalia o quanto a medida é passível de contribuir para a sustentabilidade energética. É mensurado em uma escala de cinco níveis de zero a um, onde zero representa a menor contribuição e um a maior;
- Grau de impacto sobre o desenvolvimento econômico (C8): avalia o quanto a medida contribui para o desenvolvimento econômico do país e provê oportunidades aos cidadãos. É medido em uma escala de cinco níveis de zero a um, onde zero representa o menor impacto e um o maior;



– Grau de impacto sobre a geração de empregos (C9): mede a contribuição da medida para aumentar a oferta de emprego no país. É avaliado em uma escala de cinco níveis de zero a um, onde zero representa a menor contribuição e um a maior.

A tabela 4.1 fornece a avaliação para cada medida considerada, em suas devidas escalas. Em seguida, são apresentadas as constantes de escala para os critérios na tabela 4.2. O problema considera quatro restrições: uma restrição de custo, duas restrições relativas a quantidades de medidas que podem compor o portfólio e uma restrição para medidas dependentes. Para construir a restrição de custos são fornecidos os custos de implantação das medidas aproximados na tabela 4.3. O custo máximo do portfólio foi estimado em 279 bilhões de unidades monetárias, de modo que a restrição de custos pode ser expressa por:

$$\begin{aligned}
 &33x_{SLC} + 24x_{FIT} + 40x_{TCP} + 65x_{IT\,Prod} + 35x_{RPS} + \\
 &+ 27x_{CNER} + 24x_{TCO2} + 23x_{NegE} + 60x_{D\,Imp} + 90x_{SDir} + \\
 &+ 22x_{PTec} + 25x_{IE\&T} + 30x_{MDO} + 22x_{PLAN} + 106x_{P\&D} \leq 279
 \end{aligned}
 \tag{4.51}$$

Tabela 4.1 – Avaliação das medidas

Critérios									
Medida	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
<b>SLC</b>	0,7	0,5	0,75	0	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
<b>FIT</b>	0,8	0,25	0,75	0	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
<b>TCP</b>	0,9	0,25	0,75	0,5	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
<b>ITProd</b>	0,9	0,75	0,75	0,5	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
<b>RPS</b>	0,5	0,25	0,75	0,25	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
<b>CNER</b>	0,8	0,5	0,5	0,75	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
<b>TCO2</b>	0,4	0,25	0,5	0,25	0,5	1	0,75	0,5	0,5
<b>NegE</b>	0,6	0,25	0,5	0,75	0,5	1	0,75	0,5	0,5
<b>DImp</b>	0,9	0,75	0,75	0,5	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
<b>SDirC</b>	0,9	0	0,75	0,5	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
<b>PTec</b>	0,1	0,75	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
<b>I&amp;E</b>	0,7	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
<b>MDO</b>	0,7	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1
<b>PLAN</b>	1	1	0,75	0,5	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
<b>P&amp;D</b>	0,6	0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

Tabela 4.2 – Constantes de Escala

<b>Critério</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>	<b>C5</b>	<b>C6</b>	<b>C7</b>	<b>C8</b>	<b>C9</b>
<b>Constantes de Escala</b>	0,05	0,14	0,07	0,07	0,13	0,16	0,18	0,11	0,09

Tabela 4.3 – Custos Estimado das Medidas (em bilhões de unidades monetárias)

<b>Medida</b>	<b>Custo Estimado</b>
<b>SLC</b>	33
<b>FIT</b>	24
<b>TCP</b>	40
<b>ITProd</b>	65
<b>RPS</b>	35
<b>CNER</b>	27
<b>TCO2</b>	24
<b>NegE</b>	23
<b>DImp</b>	60
<b>SDirC</b>	90
<b>PTec</b>	22
<b>I&amp;E</b>	25
<b>MDO</b>	30
<b>PLAN</b>	22
<b>P&amp;D</b>	106

A segunda restrição diz respeito ao número máximo de medidas que se aceita como viável para construir um portfólio. Esta restrição é justificada por se considerar que um grande número de medidas pode dificultar a construção dos programas, de forma que se torna inviável obter um conjunto harmônico. A equação 4.42 representa esta restrição.

$$\begin{aligned}
 &x_{SLC} + x_{FIT} + x_{TCP} + x_{ITProd} + x_{RPS} + \\
 &+ x_{CNER} + x_{TCO2} + x_{NegE} + x_{DImp} + x_{SDirC} + \\
 &+ x_{PTec} + x_{IE\&T} + x_{MDO} + x_{PLAN} + x_{P\&D} \leq 8
 \end{aligned} \tag{4.52}$$

A terceira restrição está relacionada ao número máximo de medidas fiscais e de financiamento adotadas em um portfólio. Justifica-se por considerar-se que em subconjuntos maiores desse tipo de medidas elas podem se sobrepor em efeitos similares. A equação (4.53) representa esta restrição.

$$x_{SLC} + x_{FIT} + x_{TCP} + x_{ITProd} + x_{DImp} + x_{SDirC} \leq 3 \tag{4.53}$$

A quarta restrição relaciona as medidas Negociação de Emissões (NegE) e Taxas de Carbono (TCO2). Para que se possa implantar um sistema de negociação de emissões é interessante que se implemente a precificação do carbono. A restrição utilizada estabelece que

a medida de Negociação de Emissões só será considerada no portfólio se a medida Taxas de Carbono também for. Esta restrição é apresentada na equação (4.54).

$$x_{TCO2} - x_{NegE} \geq 0 \quad (4.54)$$

De posse de todos estes dados, podem-se avaliar as medidas consideradas. A próxima etapa diz respeito à avaliação de sinergias. Utilizando a elicitação aos pares, foram identificadas as sinergias explicitadas na matriz de sinergia da figura 4.1.

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,05	0	0	0	0,05	0
0	0	0	0,07	0	0	0	0	0,07	0,1	0	0	0	0,05	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,12	0	0	0	0,07	0
0	0	0	0	0,05	0	0	0	0,09	0,1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0,2	0,09	0,1	0	0	0	0	0	0,07	0
0	0	0	0	0	0	0,15	0,2	0	0	0	0	0	0,07	0
0	0	0	0	0	0	0	0,07	0	0	0	0	0	0,05	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,07	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,12	0,15
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,09	0,11
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,09	0,05
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,14
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 4.1 – Matriz de Sinergias

Conforme mencionado anteriormente, é extremamente difícil encontrar dados disponíveis que auxiliem o analista a obter estes valores. Neste caso, para elicitar os valores de sinergias o analista deve elaborar um processo de elicitação baseado no modelo de elicitação aos pares. Para isso, podem ser utilizados questionários que permitam identificar as sinergias existentes e obter valores, se não exatos ao menos aproximados para as sinergias. O processo deve incluir também procedimentos para avaliar a consistência dos dados obtidos.

Um questionário de elicitação poderia, por exemplo, incluir algumas das seguintes perguntas ao especialista: existe sinergia entre as ações  $X_i$  e  $X_j$ ? O quanto é acrescentado à

soma dos valores de avaliação ( $V(X_i)+V(X_j)$ ) em decorrência da sinergia entre estas duas ações? A sinergia entre  $X_a$  e  $X_b$  é maior do que a sinergia entre  $X_c$  e  $X_d$ ? Além disso, é possível solicitar ao especialista que ordene as sinergias verificadas ou que estabeleça intervalos nos quais os valores de sinergia estejam incluídos. Contudo, estes artifícios têm apenas o intuito de facilitar o entendimento do especialista ou checar a consistência, pois o modelo requer que valores específicos sejam estabelecidos para as sinergias.

Para resolver o problema de Programação Inteira Pura Não Linear foi desenvolvido um algoritmo baseado na restrição do espaço de soluções para a obtenção das soluções viáveis e posterior teste dos valores da função objetivo para este conjunto. A solução obtida fornece um valor de portfólio de 6,8658, selecionando as medidas Tarifa-prêmio (FIT), Crédito à Produção (TCP), Obrigação de Renováveis (RPS), Créditos Negociáveis de Energia Renovável (CNER), Taxas de Carbono(TCO2), Negociação de Emissões (NegE), Dedução de Impostos(DImp) e Melhoria do Processo de Planejamento (Plan). As quatro restrições encontram-se ativas para o resultado obtido.

A título de comparação, o problema foi resolvido sem a consideração das sinergias, o que resultou em um modelo de Programação Linear Inteira Pura. O valor do portfólio obtido para este caso foi de 5,283, o qual se refere às medidas: Sistema de Licitações Competitivas (SLC), Crédito à Produção (TCP), Obrigação de Renováveis (RPS), Taxas de Carbono (TCO2), Negociação de Emissões (NegE), Dedução de Impostos(DImp), Capacitação e Geração de Mão-de-obra Verde (MDO) e Melhoria do Processo de Planejamento (Plan). As restrições de número máximo de medidas e de medidas econômicas ficaram ativas, assim como a de dependência, e a de custo inativa.

É válido ressaltar que como estamos lidando com problemas diferentes nestes dois casos (ao considerar as sinergias em um caso e não considerar no outro) não se pode comparar os valores do portfólio obtidos, pois são medidas diferentes. Contudo podemos ter uma idéia de quão diferente seriam os portfólios selecionados ao compará-los. A tabela 4.4 apresenta estes dois portfólios obtidos. Observa-se que o portfólio obtido no caso sem sinergias seleciona duas medidas diferentes do caso com sinergias: SLC e MDO. A próxima seção apresenta uma análise de sensibilidade baseada na comparação dos portfólios obtidos em cada caso analisado.

Tabela 4.4 – Portfólios obtidos para o problema com sinergias e sem sinergias

Medida	Portfólio caso com sinergias ( $p_v$ )	Portfólio caso sem sinergias
SLC	0	1
FIT	1	0
TCP	1	1
ITProd	0	0
RPS	1	1
CNER	1	0
TCO2	1	1
NegE	1	1
DImp	1	1
SDirC	0	0
PTec	0	0
I&E	0	0
MDO	0	1
PLAN	1	1
P&D	0	0

## 4.6 Análise de Sensibilidade e Discussão dos Resultados

Com o intuito de analisar o impacto das sinergias sobre a seleção do portfólio foi desenvolvida uma análise de sensibilidade, tomando como caso padrão a aplicação apresentada anteriormente considerando sinergias. Para realizar tal análise foi utilizada a abordagem exterior do Método de Simulação Monte Carlo, descrita em Shapiro (2003) como a abordagem em que uma amostra aleatória é gerada fora de um procedimento de otimização para que em seguida os problemas construídos com base nas observações sejam resolvidos por um algoritmo determinístico apropriado.

A seguir, a execução da proposta apresentada para análise de sensibilidade é explanada em detalhes e, posteriormente, são discutidos os seus resultados.

### 4.6.1 Análise de Sensibilidade

Para esta análise as amostras foram obtidas através da variação simultânea dos valores de sinergias observados no caso padrão em um dado intervalo. É válido ressaltar que sinergias que não foram observadas no caso padrão mantiveram-se nulas, pois o intuito da análise não é avaliar o impacto da consideração de novas sinergias, e sim avaliar o efeito de variações sobre as sinergias identificadas no caso padrão. Considerando que os valores de sinergia são pequenos comparados à avaliação das medidas e que se deseja variar as sinergias em intervalos pequenos, foi aplicada a distribuição uniforme para a geração dos valores aleatórios.

Cada combinação de valores de sinergias foi utilizada como dados de entrada para o modelo de seleção de portfólio, sendo mantidos semelhantes ao caso padrão os dados relativos à avaliação de medidas, constantes de escala e restrições. O procedimento para solução do problema de Programação Inteira Pura Não Linear é aplicado para cada combinação de valores de sinergia gerada e os resultados são comparados.

A métrica de comparação utilizada foi o número de medidas dos portfólios selecionados que diferem das medidas do portfólio obtido no caso padrão. Tal métrica deriva da comparação dos vetores de variáveis binárias que representam os portfólios, onde cada medida recebe valores zero ou um, indicando seu *status*, respectivamente, de ausência ou presença no portfólio. Poder-se-ia pensar em usar como métrica o valor da função objetivo, mas este não é um parâmetro satisfatório, pois não se pode garantir que existe uma correspondência biunívoca entre os diferentes portfólios e o seu valor.

A implementação da análise de sensibilidade foi desenvolvida em C++, uma linguagem de programação estruturada, procedural e amplamente documentada. O desenvolvimento da análise abrange uma seqüência de passos. O primeiro passo é aplicar o algoritmo de otimização ao caso padrão para obter a solução padrão. Em seguida, estabelecido o tamanho da amostra, em cada iteração são gerados valores aleatórios de sinergias com base na distribuição uniforme e no intervalo de variação estabelecido. Convencionou-se utilizar para a geração aleatória intervalos de variação percentuais sobre as sinergias. Isto significa que os parâmetros da distribuição uniforme  $U(a,b)$ , o limite inferior ( $a$ ) e o limite superior ( $b$ ), são obtidos em função do percentual desejado. Seja  $f$  um percentual sobre a sinergia  $s'_{ij}$ , tem-se que:

$$a = (1 - f)s'_{ij} \text{ e } b = (1 + f)s'_{ij} \quad (4.55)$$

Por exemplo, para um intervalo de variação de 10% os valores aleatórios serão gerados em um intervalo de -10% a +10% do valor da sinergia. Neste caso, os parâmetros da distribuição uniforme,  $a$  e  $b$ , assumem os valores  $0,9 s'_{ij}$  e  $1,1 s'_{ij}$ , respectivamente.

Depois de gerada a amostra, o algoritmo de otimização é aplicado para cada conjunto de sinergias observado, mantendo os outros dados de entrada semelhantes ao caso padrão. O algoritmo de otimização, conforme explicado na aplicação, utiliza as restrições para reduzir o espaço de soluções e, em seguida, obtém e compara os valores da função objetivo para este

conjunto de soluções viáveis. Por fim, os resultados destas aplicações são comparados ao caso padrão utilizando a métrica escolhida e as conclusões destas comparações são computadas.

Foram obtidas amostras de 10.000 elementos para os casos de variações de 10%, 15% e 20% sobre os valores de sinergias. Os principais resultados são abordados a seguir.

#### 4.6.2 Discussão dos Resultados

Com o intuito de facilitar a análise, apresentamos a seguir os valores das medidas consideradas, obtidos através da equação (4.4). Estes valores correspondem à contribuição individual de cada medida ao portfólio e independem das sinergias. São úteis para calcular a parcela de avaliação das medidas ( $VA$ ) do valor do portfólio, representada pela equação (4.6). A tabela 4.5 resume os valores das medidas.

Tabela 4.5 – Valor das medidas consideradas

Medida	$V(X_i)$
SLC	0,6580
FIT	0,6277
TCP	0,6688
ITProd	0,7402
RPS	0,6295
CNER	0,5339
TCO2	0,5661
NegE	0,6125
DImp	0,7402
SDirC	0,6330
PTec	0,5143
I&E	0,5821
MDO	0,6268
PLAN	0,7813
P&D	0,4339

O primeiro caso analisado será o da amostra obtida para variações de 10% sobre as sinergias do caso padrão. Neste caso, obteve-se em 94% das observações exatamente o mesmo portfólio obtido no caso padrão. Portanto, conclui-se que variações de 10% nas sinergias não foram suficientes para provocar alterações relevantes nos resultados. A análise da métrica de comparação para esta amostra é apresentada no gráfico da figura 4.2.

O gráfico da figura 4.2 pode ser interpretado da seguinte forma: em 94% da amostra o portfólio obtido não se diferenciou do portfólio padrão; em 1% da amostra o portfólio obtido se diferencia do padrão por uma medida; e em 5% da amostra obtiveram-se duas medidas diferentes em relação ao portfólio padrão.

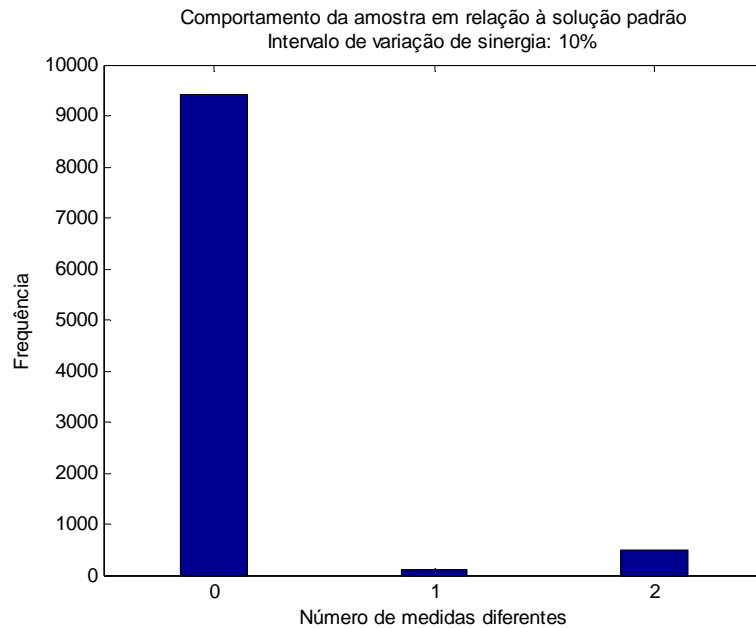


Figura 4.2 – Gráfico de frequência para o caso de variações de 10% nos valores de sinergias

Para esclarecer as mudanças ocorridas em parte da amostra devemos comparar os portfólios obtidos. A tabela 4.6 traz os portfólios obtidos: no caso padrão ( $p_r$ ); nas observações em que houve alteração em apenas uma medida ( $p_1$ ); e nas observações em que houve alteração em duas medidas ( $p_2$ ). É importante ressaltar que nas duas últimas situações sempre se obteve os mesmos portfólios para cada tipo de alteração observada.

Um fato importante que deve ser observado é que a restrição de número máximo de medidas, dada pela equação (4.52), é um limitador do problema, pois é sempre a primeira a ser ativada, representando a principal barreira para a inclusão de mais medidas no portfólio. Portanto, se pensarmos nos portfólios obtidos como resultados de alterações feitas no portfólio padrão sempre que um portfólio excluir uma medida presente no padrão ele irá incluir outra que não esteja no padrão, para continuar selecionando oito medidas. Na tabela 4.6 foram destacadas em amarelo as medidas “excluídas” do padrão e em azul as medidas “incluídas” no padrão para formar cada um dos novos portfólios  $p_1$  e  $p_2$ .

A medida que sairia do portfólio padrão para obter o portfólio  $p_1$  seria *FIT* e a que entraria seria *PTec*. Devemos então analisar as sinergias entre cada uma destas medidas e as outras presentes no portfólio, que não se alteram em relação ao padrão. Estas sinergias são obtidas através da equação (4.30) que fornece a sinergia entre duas ações. Em valores do caso padrão, são apresentadas na tabela 4.7.



Tabela 4.6 – Portfólios obtidos utilizando a amostra – caso de variações de 10%

Medida	Portfólio Caso Padrão ( $p_0$ )	Portfólio $p_1$	Portfólio $p_2$
SLC	0	0	0
FIT	1	0	0
TCP	1	1	0
ITProd	0	0	1
RPS	1	1	1
CNER	1	1	1
TCO2	1	1	1
NegE	1	1	1
DImp	1	1	1
SDirC	0	0	0
PTec	0	1	1
I&E	0	0	0
MDO	0	0	0
PLAN	1	1	1
P&D	0	0	0

Tabela 4.7 – Sinergias relevantes para o portfólio  $p_1$ 

Medida	Medida	Sinergia Padrão
<b>Incluída</b>	<b>Permanece</b>	
PTec	PLAN	0,1555
<b>Excluída</b>	<b>Permanece</b>	
FIT	DImp	0,0958
FIT	PLAN	0,0704

O que é possível concluir a partir das 97 observações que resultaram em  $p_1$  é que a sinergia entre  $PTec$  e  $PLAN$  gerada aleatoriamente em cada observação assumiu valores acima da sinergia entre as mesmas medidas no caso padrão. O oposto ocorreu para as duas sinergias da tabela 4.7 relacionadas a  $FIT$ : os valores obtidos situaram-se abaixo do respectivo valor do caso padrão. Isto significa que nestas situações houve uma sobreposição de efeitos: a redução das sinergias envolvendo  $FIT$  favorece a sua exclusão, enquanto o aumento da sinergia envolvendo  $PTec$  dá força a sua inclusão no portfólio.

Para obter  $p_2$ , as medidas que saíam do portfólio padrão seriam  $FIT$  e  $TCP$  e as que entrariam seriam  $ITProd$  e  $PTec$ . Analisando as sinergias que envolvem estas medidas em valores do caso padrão obtemos a tabela 4.8. Observe-se que esta tabela está subdividida em três partes: (1) sinergias entre uma medida que é incluída no portfólio padrão para formar  $p_2$  e uma medida do portfólio padrão que permanece em  $p_2$ ; (2) sinergias entre uma medida que é excluída do portfólio padrão para formar  $p_2$  e uma medida do portfólio padrão que permanece em  $p_2$ ; (3) sinergia entre uma medida que é incluída no portfólio padrão para formar  $p_2$  e uma medida que é excluída do portfólio padrão para formar  $p_2$ .

Tabela 4.8 – Sinergias relevantes para o portfólio  $p_2$ 

Medida	Medida	Sinergia Padrão
<b>Incluída</b>	<b>Permanece</b>	
ITProd	RPS	0,0685
ITProd	DImp	0,1332
PTec	PLAN	0,1555
<b>Excluída</b>	<b>Permanece</b>	
FIT	DImp	0,0958
FIT	PLAN	0,0704
TCP	DImp	0,1409
TCP	PLAN	0,1015
<b>Incluída</b>	<b>Excluída</b>	
ITProd	FIT	0,0958

Nesta situação torna-se muito mais difícil avaliar as sinergias, pois foram observadas 498 combinações de sinergias na amostra que forneceram o resultado  $p_2$ . A título de simplificação, iremos nos referir às sinergias entre duas medidas pelas siglas estabelecidas para as medidas separadas pelo símbolo / , o que facilita a visualização na tabela.

Sabemos que entre as sinergias envolvendo uma medida que entra no portfólio a que considera *PTec* é apenas *PTec/PLAN* e para *ITProd* tem-se duas sinergias entre esta medida e medidas que permanecem no portfólio, onde a mais relevante é *ITProd/DImp*, pois como o valor do caso padrão para esta sinergia é o maior envolvendo *ITProd* significa que as variações estarão situadas em torno de um valor maior. A mesma análise pode ser feita para as medidas excluídas do portfólio padrão para formar  $p_2$ , só que neste caso a mais relevante para cada medida excluída será a sinergia de menor valor padrão: *FIT/PLAN* para *FIT* e *TCP/PLAN* para *TCP*.

O que se pode concluir é que em cada observação que resultou em  $p_2$  ocorreu pelo menos um dos seguintes efeitos: (1) os valores aleatórios gerados para *PTec/PLAN* e para uma das sinergias envolvendo *FIT* (na maior parte dos casos *ITProd/DImp*) resultaram em valores acima do padrão; (2) os valores aleatórios gerados para uma das sinergias envolvendo *FIT* (na maioria dos casos *FIT/PLAN*) e *TCP* (na maioria dos casos *TCP/PLAN*) se situaram abaixo do valor padrão para a sinergia analisada.

É interessante ressaltar ainda que em todos os casos em que se obteve  $p_2$  a sinergia *ITProd/FIT* não foi mais relevante do que as sinergias *FIT/DImp* e *FIT/PLAN*, que atuaram como argumento de exclusão de *FIT*.

Se observarmos atentamente, as sinergias que envolvem a medida *PLAN* são as mais relevantes para determinar a entrada e saída de medidas no portfólio. Isto ocorre porque a medida *PLAN* é a alternativa de maior valor (verifica-se na tabela 4.5), o que é um forte

argumento para que seja incluída no portfólio. Portanto, variações nas sinergias que envolvem PLAN apresentam grande possibilidade de favorecer ou desfavorecer a outra medida envolvida na sinergia.

O segundo caso analisado será o da amostra obtida para variações de 15% sobre as sinergias do caso padrão. Neste caso, em quase todas as observações o portfólio obtido foi o portfólio  $p_2$  (explicitado na tabela 4.6), que apresenta alteração de duas medidas em relação ao caso padrão. Apenas quinze observações resultaram no portfólio padrão, o que pode ser verificado na tabela de frequências 4.9.

Tabela 4.9 – Tabela de frequências – caso de variações de 15%

	Portfólio Caso Padrão ( $p_p$ )	Portfólio $p_2$
<b>Frequência Absoluta</b>	15	9985
<b>Frequência Relativa</b>	0,15%	99,85%
<b>Valor do portfólio sem sinergias (VA)</b>	5,1598	5,1179

Portanto, houve uma alteração relevante dos resultados obtidos a partir da variação de sinergias em um intervalo de 15% comparada à variação no intervalo de 10%. Teoricamente, entre as possíveis combinações obtidas no intervalo de 15% estão inclusas as combinações obtidas no intervalo de 10%. Entretanto, se dividirmos o intervalo de variação em seis partes iguais, de modo que variações até 10% equivalam a  $\frac{4}{6}$  do intervalo e variações entre 10% e 15% equivalam a  $\frac{2}{6}$  do intervalo, teremos que a probabilidade de ocorrerem variações de até 10% nos valores de todas as sinergias para o intervalo de 15% de variação é dada por  $0,67^{30}$ , que equivale a uma probabilidade na ordem de  $10^{-6}$ . Conseqüentemente, é muito pouco provável que no intervalo de variação de 15% seja gerada uma combinação de sinergias exatamente igual a uma combinação gerada no intervalo de 10% de variação. Além disso, em 5% das observações do caso em que as sinergias variaram até 10% obtém-se exatamente o resultado mais freqüente no caso do intervalo de variação de 15%.

O que podemos concluir da análise deste caso é que a possibilidade de se obter variações um pouco maiores nas sinergias relevantes para a obtenção do portfólio  $p_2$  (apresentados na tabela 4.8) influenciou sobremaneira a amostra obtida. Analisando as quinze

observações que resultaram no portfólio padrão verificou-se que as variações observadas nas sinergias *ITProd/DImp*, *PTec/PLAN*, *FIT/PLAN* e *TCP/PLAN* são muito pequenas, em alguns casos irrelevantes, o que consiste em argumento satisfatório para a seleção do portfólio padrão.

O último caso analisado será o da amostra obtida para variações de 20% sobre as sinergias do caso padrão. Este caso revelou resultados mais complexos do que os obtidos nas análises anteriores. Na maioria das observações obteve-se como resultado um novo portfólio que difere do portfólio padrão por duas medidas, denominado  $p_3$ , apesar de um número relevante de observações resultar no portfólio  $p_2$ , que também se distingue do padrão por duas medidas. Além disso, pequenas parcelas da amostra resultaram no portfólio padrão e em um quarto portfólio, o qual difere do padrão por três medidas. Estes portfólios são explicitados na tabela 4.10, onde foram destacadas em amarelo as medidas “excluídas” do padrão e em azul as medidas “incluídas” no padrão para formar cada um dos novos portfólios  $p_2$ ,  $p_3$  e  $p_4$ .

Tabela 4.10 – Portfólios obtidos utilizando a amostra – caso de variações de 20%

Medida	Portfólio Caso Padrão ( $p_p$ )	Portfólio $p_2$	Portfólio $p_3$	Portfólio $p_4$
SLC	0	0	0	0
FIT	1	0	1	0
TCP	1	0	0	0
ITProd	0	1	1	1
RPS	1	1	0	1
CNER	1	1	1	1
TCO2	1	1	1	1
NegE	1	1	1	1
DImp	1	1	1	0
SDirC	0	0	0	0
PTec	0	1	0	0
I&E	0	0	0	1
MDO	0	0	1	1
PLAN	1	1	1	1
P&D	0	0	0	0

Verifica-se neste caso um deslocamento da solução mais freqüente no caso de variações de 15% de  $p_2$ , para  $p_3$  no caso de variação de 20%. Sabemos que ambos se diferenciam do portfólio padrão por duas medidas, das quais uma é a mesma: *ITProd*. Se compararmos  $p_3$  a  $p_2$  veremos que estes dois portfólios também diferem entre si por duas medidas.

Consideram-se os resultados semelhantes ao portfólio padrão e  $p_4$  irrelevantes, pois juntos representam menos de 1% das observações. A tabela 4.11 apresenta a freqüência destes

e dos outros resultados. Contudo, analisaremos os efeitos de sinergia que podem contribuir para estes resultados.

Tabela 4.11 – Tabela de frequências – caso de variações de 20%

	Portfólio Caso Padrão ( $p_p$ )	Portfólio $p_2$	Portfólio $p_3$	Portfólio $p_4$
<b>Frequência Absoluta</b>	4	634	9360	2
<b>Frequência Relativa</b>	0,04%	6,34%	93,6%	0,02%

As análises das sinergias nos levarão às mesmas conclusões obtidas anteriormente para as observações que resultaram em  $p_2$ . A análise das quatro observações que resultaram em  $p_p$  mostra que as sinergias obtidas em cada observação são muito próximas às sinergias do caso padrão, o que justifica o resultado semelhante.

Prosseguindo à análise das sinergias ativas em  $p_3$ , as quais são apresentadas na tabela 4.12, observa-se que o número de sinergias envolvidas nesta situação é maior do que para os outros portfólios. Assim como a tabela 4.8, a tabela 4.12 também está subdividida em três grupos de sinergia de interesse: (1) sinergias entre uma medida que é incluída no portfólio padrão para formar  $p_3$  e uma medida do portfólio padrão que permanece em  $p_3$ ; (2) sinergias entre uma medida que é excluída do portfólio padrão para formar  $p_3$  e uma medida do portfólio padrão que permanece em  $p_3$ ; (3) sinergia entre uma medida que é incluída no portfólio padrão para formar  $p_3$  e uma medida que é excluída do portfólio padrão para formar  $p_3$ .

Tabela 4.12 – Sinergias relevantes para o portfólio  $p_3$

Medida	Medida	Sinergia Padrão
<b>Incluída</b>	<b>Permanece</b>	
ITProd	FIT	0,0958
ITProd	DImp	0,1332
MDO	PLAN	0,1267
<b>Excluída</b>	<b>Permanece</b>	
TCP	DImp	0,1409
TCP	PLAN	0,1015
RPS	CNER	0,2327
RPS	TCO2	0,1076
RPS	NegE	0,1242
RPS	PLAN	0,0988
<b>Incluída</b>	<b>Excluída</b>	
ITProd	RPS	0,0685

Seria inviável analisar as variações obtidas para as sinergias em cada observação da amostra. Entretanto, sabemos que a probabilidade de que as sinergias geradas em uma observação apresentem variações de valores em um mesmo intervalo é bastante pequena, já que estamos lidando com a probabilidade conjunta de trinta valores de sinergia. Portanto, é mais provável que uma das sinergias atinja uma variação próxima a 20%. Para se ter idéia, uma variação de 20% sobre o valor padrão da sinergia *ITProd/DImp* já supera a sinergia *TCP/DImp* e torna *ITProd* mais interessante do que *TCP*, quando avaliado seu valor acrescido da sinergia que tem potencial de proporcionar.

O que se pode afirmar em relação às observações que resultaram em  $p_3$  é que ocorreu pelo menos uma das seguintes situações: (1) os valores gerados para pelo menos uma das sinergias relacionadas às medidas *ITProd* e *MDO* atingiram valores superiores ao padrão; e (2) os valores gerados para pelo menos uma das sinergias relacionadas às medidas excluídas *TCP* e *RPS* resultaram em valores inferiores ao padrão.

Para as observações que resultaram no portfólio  $p_4$ , apesar das sinergias envolvidas estarem dispostas em uma configuração mais intrincada em relação às sinergias relevantes para a obtenção de outros portfólios o número reduzido de observações, apenas duas, permite uma análise caso a caso.

A tabela 4.13 apresenta as sinergias relacionadas à seleção de  $p_4$ . Esta tabela está subdividida em cinco grupos de sinergia de interesse: (1) sinergias entre uma medida que é incluída no portfólio padrão para formar  $p_4$  e uma medida do portfólio padrão que permanece em  $p_4$ ; (2) sinergias entre uma medida que é excluída do portfólio padrão para formar  $p_4$  e uma medida do portfólio padrão que permanece em  $p_4$ ; (3) sinergia entre uma medida que é incluída no portfólio padrão para formar  $p_4$  e uma medida que é excluída do portfólio padrão para formar  $p_4$ ; (4) sinergia entre duas medidas que são incluídas no portfólio padrão para formar  $p_4$ ; (5) sinergia entre duas medidas que são excluídas do portfólio padrão para formar  $p_4$ .

Nas duas observações que resultaram em  $p_4$  as sinergias *ITProd/RPS*, *I&E/PLAN* e *MDO/PLAN* apresentaram valores superiores aos do caso padrão, e, quando analisadas em conjunto com o valor das medidas incluídas permitiram obter um maior valor de portfólio do que seria obtido para  $p_p$ ,  $p_2$  ou  $p_3$ , utilizando as sinergias geradas. Portanto, para estas duas observações isoladas as sinergias referidas foram responsáveis pela escolha de  $p_4$ , um portfólio que difere do padrão por três medidas.

Tabela 4.13 – Sinergias relevantes para o portfólio  $p_4$ 

Medida	Medida	Sinergia Padrão
<b>Incluída</b>	<b>Permanece</b>	
ITProd	RPS	0,0685
I&E	PLAN	0,1227
MDO	PLAN	0,1267
<b>Excluída</b>	<b>Permanece</b>	
FIT	PLAN	0,0704
TCP	PLAN	0,1015
<b>Incluída</b>	<b>Excluída</b>	
ITProd	FIT	0,0958
ITProd	Dimp	0,1332
<b>Incluída</b>	<b>Incluída</b>	
I&E	MDO	0,1209
<b>Excluída</b>	<b>Excluída</b>	
FIT	Dimp	0,0958
TCP	Dimp	0,1409

A análise das três amostras geradas a partir de intervalos de variação de sinergias diferentes permite que algumas conclusões sejam obtidas para o caso analisado. Estas conclusões podem servir para construir recomendações que o analista deve propor ao decisor.

Primeiramente, a principal conclusão que se pode extrair da análise realizada é que o modelo utilizado permite considerar sinergias de forma relevante, pois estas efetivamente influenciam o resultado final. Observou-se que variações pequenas em algumas sinergias podem provocar alterações relevantes no portfólio a ser selecionado. Até mesmo o caso padrão resultaria na escolha de outro portfólio se as sinergias não fossem consideradas.

É importante ressaltar o quanto é delicado falar de variações de sinergia. As sinergias são valores pequenos comparadas aos valores das medidas, mas influenciam o processo de seleção. Por conseguinte, as variações percentuais sobre valores de sinergia consideradas nesta análise são ainda menores do que as sinergias e ainda assim contribuem para alterações no portfólio selecionado. Cabe esclarecer que nem sempre variações isoladas de sinergia serão suficientes para alterar o resultado, mas seu efeito conjunto pode gerar maior influência para isto, salvo os casos em que esses efeitos se contrabalanceiem.

Os fatos ressaltados anteriormente conduzem ao argumento de que, dado que as sinergias são relevantes, elas provavelmente terão influência sobre o resultado do modelo de seleção de portfólio. Contudo, cabe ao decisor identificar a relevância das sinergias, o que não ocorre através de um processo simples, dada a subjetividade da relação que se está tratando. Mesmo convencido de que deve considerar sinergias no seu problema o decisor se depara ainda com a difícil tarefa de valorá-la. O modelo de elicitação aos pares se coloca como uma

das formas possíveis de facilitar esta valoração. Mas, mesmo fornecendo valores para as interações sinérgicas que identifica, pode restar dúvidas acerca da exatidão dos valores. A análise de sensibilidade desenvolvida se propõe a elucidar tais dúvidas.

Para o problema analisado, as sinergias fornecidas pelo decisor resultaram na seleção do portfólio padrão. Caso o decisor esteja seguro quanto aos valores de sinergia, o portfólio político indicado para implantação é o portfólio padrão. Porém, se restam dúvidas acerca dos valores de sinergia elicitados, o analista poderia fazer recomendações com base na análise realizada. Se o decisor acredita que os valores reais de sinergia estão situados em um intervalo de variação de 10% do valor fornecido, ainda seria recomendado implantar o portfólio padrão. Contudo, se o decisor acredita que os valores reais podem estar em um intervalo de variação superior a 10% a recomendação seria realizada com mais cautela. Para variações até 15% recomendar-se-ia ao decisor a consideração do portfólio  $p_2$ , cabendo a este analisar mais acuradamente suas preferências em relação a  $p_2$  e  $p_p$ . Por outro lado, se o decisor não estiver seguro de que a avaliação fornecida para as sinergias esteja no intervalo de 15%, mas considerar um intervalo de variação de 20% do seu valor, a recomendação seria considerar  $p_p$ ,  $p_2$  e  $p_3$  para comparação, preferencialmente  $p_2$  e  $p_3$ , pois são resultados mais estáveis em intervalos de variação maiores.

#### 4.7 Conclusões do Capítulo

Neste capítulo foi apresentado o modelo de seleção de portfólio desenvolvido por Almeida & Duarte (2011). Este modelo se baseia em uma elicitación individual para avaliar sinergias. A análise do modelo de elicitación individual tornou clara a necessidade de formalização de alguns aspectos relativos a sinergia, como a tangibilidade dos entes envolvidos, a questão da discretização de sinergias e sua relação com o ponto de vista do especialista.

Com base na teoria formalizada acerca de sinergias foi proposto um modelo para a elicitación dos seus valores. Tal modelo se apresenta como uma opção para a difícil tarefa de elicitación. A comparação do modelo de elicitación aos pares ao individual permitiu tirar conclusões matemáticas fortes a respeito de sua estrutura. Foi provado que satisfeita uma hipótese de unicidade de sinergias os dois modelos de elicitación abordados são equivalentes. Outros resultados derivam desse importante resultado da elicitación de sinergias.



A aplicação e análise de sensibilidade oferecem uma boa oportunidade para perceber como se comportam as sinergias elicítadas no modelo de portfólio como um todo. As conclusões reafirmam a dificuldade do processo de elicitação e mostram que, apesar de serem representadas por valores pequenos, as sinergias influencia a decisão de portfólio.

## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

As implicações da sustentabilidade como um objetivo político são inerentemente complexas, ainda mais por envolver diferentes perspectivas. A sua evidência no cenário global gera tendências políticas internacionais que são refletidas nas políticas das nações. Incentivos financeiros às energias renováveis, obrigações de produção de renováveis e a instituição de negociações de emissões são algumas das medidas políticas possíveis para direcionar a matriz energética de um país para a sustentabilidade.

Por sua tradição em geração de energia hidroelétrica o Brasil se colocou em uma posição de vantagem no caminho da sustentabilidade. Contudo, manter-se no mesmo curso pode colocar o país distante do objetivo sustentável no decorrer de alguns anos, provavelmente adiando decisões de expansão necessárias e descartando a exploração de novas tecnologias, tão importantes para a diversificação da matriz. A reestruturação do setor elétrico brasileiro e os programas energéticos adotados contribuíram bastante, porém novas estratégias são necessárias. Neste sentido, o presente trabalho contribui para discussões acerca de novos programas políticos a serem desenvolvidos e das tecnologias a serem fomentadas.

No que tange à elaboração de políticas sustentáveis, este trabalho aborda o problema através da perspectiva de portfólio. Para tanto, foram desenvolvidos amplos levantamentos acerca das abordagens utilizadas para tratar problemas de portfólio e do uso de métodos de Apoio Multicritério a Decisão para solucionar problemas no contexto de energia sustentável.

O problema de seleção de fontes de energia alternativas é bastante abordado na literatura. Na aplicação desenvolvida buscou-se aliar ao conhecimento existente as particularidades do caso brasileiro, a fim de sugerir um plano de ação o mais próximo possível da realidade. A aplicação do método PROMETHEE forneceu como estratégia o investimento na geração eólica, em Pequenas Centrais Hidroelétricas e em Usinas à Biomassa, ressaltando ainda o potencial a ser explorado da tecnologia de geração fotovoltaica.

A análise desenvolvida acerca da elicitação de sinergias evidencia que esta é uma tarefa altamente dependente do conjunto de alternativas consideradas e da percepção do especialista. Cabe ao analista investigar qual modelo de elicitação é apropriado ao problema em questão. Além disso, esta discussão mostrou-se fundamental para a proposição do novo modelo de elicitação.

Em relação ao modelo de elicitação aos pares, gerado como produto desta tese, as aplicações são ilimitadas, pois pode ser utilizado em problemas de portfólio relacionados a contextos diversos, além da elaboração de políticas sustentáveis.

Tanto o modelo de elicitação individual quanto o modelo de elicitação aos pares consistem em alternativas viáveis, porém não redimem o analista de sua tarefa de avaliar a aplicabilidade. Comparado ao modelo de elicitação individual, o modelo de elicitação aos pares exige menos informação ao especialista, contudo, este deve estar capaz de fornecer as informações de sinergia ao nível de agregação requisitado. Os prós e contras precisam ser avaliados, assim como a capacidade do especialista.

A formulação matemática dos modelos de elicitação abordados mostrou-se robusta, gerando resultados matemáticos relevantes através da comparação dos modelos. As consequências do Teorema 1, que estabelece que quando a hipótese de unicidade de sinergias é satisfeita os modelos são equivalentes, são de uma riqueza impressionante. Este resultado permite o desenvolvimento de avaliações de consistência dos dados elicitados utilizando um dos modelos, análises de comportamento no processo de elicitação, além da proposição de novos modelos matematicamente relacionados aos existentes através da hipótese do teorema.

Para o problema de seleção de portfólio de políticas sustentáveis proposto o método aplicado contribui com a sugestão de implementação de programas baseados em oito medidas, dentre as quais algumas já figuram em grande parte dos programas existentes. A principal contribuição é dada pela sugestão de implementação de obrigações em renováveis, negociação de emissões e geração de mão-de-obra verde. Os RPSs de vários estados americanos e alguns outros países podem servir de guia para a geração de tais obrigações nos países interessados. A criação de um mercado interno de carbono ainda é incipiente no Brasil e fomentá-la parece ser um passo importante. No que diz respeito à mão-de-obra, o Brasil é um país em desenvolvimento e apresenta grandes *déficits* de mão-de-obra especializada. Capacitar trabalhadores para operar plantas de geração renovável irá preparar o setor para novos investimentos.

## 5.1 Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros a esta tese sugere-se:

- A aplicação de outros métodos multicritério ao problema de seleção de fontes de energia alternativas;

- A Construção dos programas baseados nas medidas selecionadas na aplicação desenvolvida para seleção de portfólio de políticas em energia sustentável, propondo metas e prazos;
- A elaboração de processos de elicitação de sinergias baseados em três ou mais ações;
- O desenvolvimento de modelos para seleção de portfólio que agreguem as sinergias por processos diferentes do aditivo;
- O desenvolvimento de processos de elicitação de sinergia baseados nos modelos de elicitação individual e aos pares;
- A implementação de Sistemas de Apoio a Decisão para operacionalizar o modelo de seleção de portfólio proposto.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). 2008. *Atlas da Energia Elétrica no Brasil*. Brasil: ed. Brasília.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). 2011. *Banco de Informações de Geração (BIG)*. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acessado em: 08/06/2011.
- ALLAN, G.; EROMENKO, I.; MCGREGOR, P.; SWALES, K. 2011. The regional electricity generation mix in Scotland: A portfolio selection approach incorporating marine technologies. *Energy Policy*, 39: 6–22.
- ALMEIDA, A. T. *O Conhecimento e o Uso de Métodos Multicritério de Apoio a Decisão*. Editora Universitária da UFPE. 2011.
- ALMEIDA, A.T.; DUARTE, M.D.O. 2011. A multi-criteria decision model for selecting project portfolio with consideration being given to a new concept for synergies. *Pesquisa Operacional* [online], 31(2): 301-318.
- ALMEIDA, A.T.; VETSCHERA, R. 2011. Project Portfolios Selection Based on MCDM Models. *INFORMS meeting*, Charlotte, NC.
- AMERICAN COUNCIL FOR AN ENERGY-EFFICIENT ECONOMY (ACEEE). 2007. *The Twin Pillars of Sustainable Energy: Synergies between Energy Efficiency and Renewable Energy Technology and Policy*. Washington, DC.
- ANTUNES, C.H.; GOMES, A. 2009. Operational research models and methods in the energy sector. *European Journal of Operational Research*, 197: 997–998.
- APPERSON, C.; AREFZADEH, F.; DINSMORE, A.; GRABOWSKI, R.; MAY, D.; MORANDI, K.; TAWNEY, B.; WHITE Jr., K.P. Project Selection for Technology Investment. In: *Systems and Information Engineering Design Symposium*, Virginia, 2005.
- AUSTEN-SMITH, D.; BANKS, J. 1990. Stable Governments and the Allocation of Policy Portfolios. *The American Political Science Review*, 84(3): 891-906.
- BEECY, D.J.; PRINCIPLE; SIMBECK, D. 2011. Assessing Innovative National Policy Options and Roles for CCS in a Post-Kyoto Framework. *Energy Procedia*, 4:5861–5868.
- BELTON, V.; STEWART, T.J. *Multiple Criteria Decision Analysis*. Kluwer Academic Publishers, 2002.
- BHATTACHARYA, A.; KOJIMA, S. 2010. Power sector investment risk and renewable energy: A Japanese case study using portfolio risk optimization method. *Energy Policy*, doi:10.1016/j.enpol.2010.09.031.

- 
- BISHOP, J.D.K.; AMARATUNGA, G.A.J. RODRIGUEZ, C. 2009. Linking energy policy, electricity generation and transmission using strong sustainability and co-optimization. *Power & Energy Society General Meeting, PES '09, IEEE*, p. 1 – 7.
- BRADI, M.A.; DAVIS, D.; DAVIS, D. 2001. A comprehensive 0-1 goal programming model for project selection. *International Journal of Project Management*, 19: 243-252.
- BRANS, J.P.; MARESCHAL, B. 1992. PROMETHEE V: MCDM problems with segmentations constraints. *Information Systems and Operational Research Journal*, 30(2): 85-96.
- BRANS, J.P.; MARESCHAL, B. 2002. PROMÉTHÉE - GAIA: une méthodologie d'aide à la décision en présence de critères multiples. Bruxelles: Éditions de L'Université de Bruxelles.
- BROWN, D.T. 1981. Learning general systems theory through an experiential workshop. In DURKIN, J.E. (Ed.), *Living Groups: Group psychotherapy and general system theory* (p. 284-293). New York: Brunner/Mazel.
- CAMPELLO DE SOUZA, F.M. 2007. Decisões racionais em situações de incerteza. Recife: Editora Universitária.
- CASA CIVIL DA PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. 2008. Plano Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC – Versão para Consulta Pública. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>>.
- CHARNES, A.; COOPER, W.W.; RHODES, E. Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*, v.2, n.6, p.429-444, 1978.
- CHEN, T-Y; YU, O.S.; HSU, G.J-Y.; HSU, F-M; SUNG, W-N. 2009. Renewable energy technology portfolio planning with scenario analysis: A case study for Taiwan. *Energy Policy*, 37: 2900–2906.
- COFFIN, M.A.; TAYLOR III, B.W. 1996. Multiple Criteria R&D Project Selection and Scheduling using Fuzzy Logic. *Computers & Operations Research*, 23(3): 207-220.
- COHEN K.J.; POGUE, J.A. 1967. An Empirical Evaluation of Alternative Portfolio-Selection Models. *The Journal of Business*, 40(2): 166-193.
- CORNING, P.A. 1998. The Synergism Hypothesis – On the Concept of Synergy and It's Role in the Evolution of Complex Systems. *Journal of Social and Evolutionary Systems*, 21(2): 1-30.
- COWAN, K.R.; DAIM, T. 2009. Comparative technological road-mapping for renewable energy. *Technology in Society*, 31:333–341.
- DAIM, T.; COWAN, K. 2010. Assessing renewable energy portfolio futures with multiple perspectives: The case of the northwest US. *Technology in Society*, 32: 255–263.

- 
- DAIM, T.; YATES, D.; PENG, Y.; JIMENEZ, B. 2009. Technology assessment for clean energy technologies: the case of the Pacific Northwest. *Technology in Society*, 31:232–243.
- DAIM, T.U.; KAYAKUTLU, G.; COWAN, K. 2010. Developing Oregon's renewable energy portfolio using fuzzy goal programming model. *Computers & Industrial Engineering*, 59: 786–793.
- DIAS, L.C.; CLÍMACO, J.N. 2000. Additive aggregation with variable interdependent parameters: The VIP analysis software. *Journal of Operational Research Society*, 51: 1070-1082.
- DOERNER, K.F.; GUTJAHR, W.J.; HARTL, R.F.; STRAUSS, C.; STUMMER, C. 2006. Pareto ant colony optimization with ILP preprocessing in a multiobjective project portfolio selection. *European Journal of Operational Research*, 171: 830-841.
- DOUKAS, H.Ch.; ANDREAS, B.M.; PSARRAS, J.E.. 2007. Multi-criteria decision aid for the formulation of sustainable technological energy priorities using linguistic variable. *European Journal of Operational Research*, 182: 844–855.
- EDWARDS, W.; BARRON, F.H. 1994. Smarts and Smarter: Improved Simple Methods for Multiattribute Utility Measurement. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 60: 306-325.
- ELETROBRAS. Disponível em:  
<<http://www.elektrobras.com/elb/data/Pages/LUMIS0389BBA8PTBRIE.htm>> acessado em 1/09/2011.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). 2010. *Balanço Energético Nacional 2010*: ano base 2009. Rio de Janeiro: EPE.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). 2006. *Clean Energy-Environment Guide to Action* – Policies, Best Practices, and Action Steps for States. United States: EPA.
- EVANS, A.; STREZOV, V.; EVANS, T.J. 2009. Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13: 1082–1088.
- FISHBONE, L.G.; ABILOCK, H. 1981. MARKAL, a linear-programming model for energy systems analysis: Technical description of the BNL version. *International Journal of Energy Research*, 5: 353–375.
- FISHBURN, P.C. 1967. Methods of estimating additive utilities. *Management Science*, 13(7).
- FUSS, S.; SZOLGAYOVA, J.; KHABAROV, N.; OBERSTEINER, M. 2010. Renewables and climate change mitigation: Irreversible energy investment under uncertainty and portfolio effects. *Energy Policy*, doi:10.1016/j.enpol.2010.06.061.

- 
- GERMAN FEDERAL MINISTRY FOR THE ENVIRONMENT, NATURE CONSERVATION AND NUCLEAR SAFETY (BMU). 2009. *Renewable Energies – Innovations for a Sustainable Energy Future*. Germany: BMU.
- GHASEMZADEH, F.; ARCHER, N.P. 2000. Project portfolio selection through decision support. *Decision Support Systems*, 29: 73-88.
- GHASEMZADEH, F.; ARCHER, N.P.; IYOGUN, P. 1999. A zero-one model for project selection and scheduling. *Journal of the Operational Research Society*, 50: 745-755.
- GOLABI, K.; KIRKWOOD, C.W.; SICHERMAN, A. 1981. Selecting a portfolio of solar energy projects using multi-attribute preference theory. *Management Science*, 27 (2): 174-189.
- GOLDEMBERG, J.; MOREIRA, J.R. 2005. Política Energética no Brasil. *Estudos Avançados*, 19 (55): 215-228.
- GOODWIN, P.; WRIGHT, G. 1991. *Decision Analysis for Management Judgment*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- GRACZYK, S. L. 1993. Get with the system: General systems theory for business officials. *School Business Affairs*, 59 (2): 16–20.
- GRAVES, S. B.; RINGUEST, J.L. 1991. Evaluating competing R&D investments [adjusting for time and risk in present value decision-making model]. *Research Technology Management*, 34: 32-36.
- HALL, N.G.; HERSHEY, J.C.; KESSLER, L.G.; STOTTS, R.C. 1992. A model for making project funding decisions at the National Cancer Institute. *Operations Research*, 40: 1040-1052.
- HOBBS, B.F.; MEIER, P.M. 1994. Multicriteria methods for resource planning: an experimental comparison. *IEEE Transactions on Power Systems*, 9(4):1811–1817.
- HOFMAN, K.; LI, X. 2009. Canada's energy perspectives and policies for sustainable development. *Applied Energy*, 86: 407–415.
- HSUEHA, S-L; YAN, M-R. 2011. Enhancing Sustainable Community Developments: A Multi-criteria Evaluation Model for Energy Efficient Project Selection. *Energy Procedia*, 5: 135–144.
- HUANG, J.P.; POH, K.L.; ANG, B.W. 1995. Decision analysis in energy and environmental modeling. *Energy*, 20(9):843–55.
- INTERACADEMY COUNCIL. 2007. *Lighting the way: Toward a sustainable energy future*.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). 2011. Summary for Policymakers. In: IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von



- 
- Stechow (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido e Nova York, Estados Unidos.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). 2006. *Brazil: a country profile on sustainable energy development*. Vienna : IAEA Library.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). 2011a. Clean Energy Progress Report. France: OECD/IEA.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). 2011b. Políticas e medidas em eficiência energética no Brasil. Disponível em: <<http://www.iea.org/textbase/pm/?mode=pm&action=view&country=Brazil>> acessado em 01/09/2011.
- IRGENS, C.; PAULSEN, J. 2004. Optimal control of risk exposure, reinsurance and investments for insurance portfolios. *Insurance: Mathematics and Economics*, 35: 21–51.
- JACQUET-LAGRÈZE, E.; SISKOS, J. 1982. Assessing a set of additive utility functions for multicriteria decision-making, the UTA method. *European Journal of Operational Research*, 10(2): 151-164.
- JOHANSSON, T.B.; GOLDEMBERG, J. 2002. Overview and A Policy Agenda. In: *Energy for Sustainable Development – A policy Agenda* [edited by TB. Johansson and J. Goldemberg], New York: United Nations Development Programme (UNDP), 1-23.
- JUNIPER, C.; MOORE, M. 2002. Synergies and Best Practices of Corporate Partnerships for Sustainability. *Corporate Environmental Strategy*, 9 (3): 267-276.
- KATZ, D.; KAHN, R.L. 1978. *The Social Psychology of Organizations*, Wiley, New York.
- KEENEY, R.L.; RAIFFA, H. 1976. *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-offs*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- KERN, F.; SMITH, A. 2008. Restructuring energy systems for sustainability? Energy transition policy in the Netherlands. *Energy Policy*, 36: 4093– 4103.
- KLAPKA, J.; PIÑOS, P. 2002. Decision support system for multicriterial R&D and information systems projects selection. *European Journal of Operational Research*, v.140, s.n., p.434-446.
- KOMAREK, T.M.; LUPI, F.; KAPLOWITZ, M.D. 2011. Valuing energy policy attributes for environmental management: Choice experiment evidence from a research institution. *Energy Policy*, 39: 5105–5115.
- KONNO, H.; KOBAYASHI, K. 1997. An integrated stock-bond portfolio optimization model. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 21: 1427-1444.
- KRANZL, L.; STADLER, M.; HUBER, C.; HAAS, R.; RAGWITZ, M.; BRAKHAGE, A.; GULAC, A.; FIGORSKI, A. 2006. Deriving efficient policy portfolios promoting

- 
- sustainable energy systems—Case studies applying Invert simulation tool. *Renewable Energy*, 31: 2393–2410.
- LAHDELMA, R.; SALMINEN, P.; HOKKANEN, J. 2000. Using multicriteria methods in environmental planning and management. *Environmental Management*, 26(6):595–605.
- LIESIÖ, J.; MILD, P.; SALO, A. Preference programming for robust portfolio modeling and project selection. *European Journal of Operational Research*, 2006.
- LINTON, J.D.; WALSH, S.T.; MORABITO, J. 2002. Analysis, ranking and selection of R&D projects in a portfolio. *R&D Management*, 32(2).
- LIU, M.; WU, F-F. 2007. Portfolio optimization in electricity markets. *Electric Power Systems Research*, 77: 1000–1009.
- LIXIN, Q. 2011. The research of energy sustainable development strategy in China-Based on the analysis of multi-objective decision. *Energy Procedia*, 5: 1093–1098.
- LUCON, O.; GOLDEMBERG, J. 2009. Crise financeira, energia e sustentabilidade no Brasil. *Estudos Avançados*, 23(65): 121-130.
- MARESCHAL, B.; BRANS, J.P. 1988. Geometrical representation for MCDM – the GAIA procedure. *European Journal of Operational Research*, 34: 69-77.
- MARKOVITZ, H. 1952. Portfolio selection. *Journal of Finance*, 7(1):77-91.
- MARMÓL, A.M.; PUERTO, J.; FERNÁNDEZ, F.R. 1998. The use of partial information on weights in multicriteria decision problems. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 7:322-329.
- MICHALENA, E.; HILLS, J.; AMAT, J-P. 2009. Developing sustainable tourism, using a multicriteria analysis on renewable energy in Mediterranean Islands. *Energy for Sustainable Development*, 13: 129–136.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). 2003. Modelo Institucional do Setor Elétrico. Disponível em: <<http://ucel.eln.gov.br>>.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/4016.html>>. Acessado em 01/09/2011.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Programa Nacional da Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural. Disponível em: <<http://www.conpet.gov.br>>. Acessado em 01/09/2011.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME); EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). 2007. *Plano Nacional de Energia 2030*. Brasil: MME.
- MÖLLER, C.; RACHEV, S.T.; FABOZZI, F.J. 2011. Balancing energy strategies in electricity portfolio management. *Energy Economics*, 33: 2–11.

- 
- MOORE, J.R.; BAKER, N.R. 1969. Computational Analysis of Scoring Models for R & D Project Selection. *Management Science*, 16.
- MÜLLER-STEINHAGEN, H.; NITSCH, J. 2005. The Contribution of Renewable Energies to a Sustainable Energy Economy. *Process Safety and Environmental Protection*, 83(4): 285-297.
- O'CONNOR, J.; MCDERMOTT, I. 1997. *The Art of Systems Thinking*. Thorsons, San Francisco.
- OLIVEIRA, F.A. de; PAIVA, A.P. de; LIMA, J.W.M.; BALESTRASSI, P.P.; MENDES, R.R.A. 2011. Portfolio optimization using Mixture Design of Experiments: Scheduling trades within electricity markets. *Energy Economics*, 33: 24-32.
- PALMER, K.; BURTRAW, D. 2005. Cost-effectiveness of renewable electricity policies. *Energy Economics*, 27: 873-894.
- PALMER, K.; PAUL, A.; WOERMAN, M.; STEINBERG, D.C. 2011. Federal policies for renewable electricity: Impacts and interactions. *Energy Policy*, 39: 3975-3991.
- PATLITZIANAS, K.D.; DOUKAS, H.; KAGIANNAS, A.G.; PSARRAS, J. 2008. Sustainable energy policy indicators: Review and recommendations. *Renewable Energy*, 33: 966-973.
- PAUL, A.; BURTRAW, D.; PALMER, K. 2009. Haiku Documentation: RFF's Electricity Market Model version 2.0. Report. Resources for the Future, Washington, DC.
- POHEKAR, S.D.; RAMACHANDRAN, M. 2004. Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8: 365-381.
- PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE (PMI), Estados Unidos. *A guide to the project management body of knowledge: PMBOK guide*. 4.ed. Pennsylvania, 2008.
- PUGH, G.; CLARKE, L.; MARLAY, R.; KYLE, P.; WISE, M.; MCJEON, H.; CHAN, G. 2011. Energy R&D portfolio analysis based on climate change mitigation. *Energy Economics*, 33: 634-643.
- RAFAJ, P.; BARRETO, L.; KYPREOS, S. 2006. Combining policy instruments for sustainable energy systems: An assessment with the GMM model. *Environmental Modeling and Assessment*, 11: 277-295.
- REN21. 2011. *Renewables 2011 Global Status Report* (Paris: REN21 Secretariat).
- RENEWABLE ENERGY & ENERGY EFFICIENCY PARTNERSHIP (REEEP). Disponível em: <<http://www.reeep.org>>. Acessado em 01/09/2011.
- RINGEST, J.L.; GRAVES, S.B.; CASE, R.H. 2004. Mean-Gini analysis in R&D portfolio selection. *European Journal of Operational Research*, 154: 157-169.

- 
- ROCHA, P.; KUHN, D.. 2011. Multistage Stochastic Portfolio Optimisation in Deregulated Electricity Markets Using Linear Decision Rules. *European Journal of Operational Research*, doi: 10.1016/j.ejor.2011.08.001.
- ROSENHEAD, J. *Rational analysis for a problematic world: problem structuring methods for complexity, uncertainty and conflict*. New York: John Wiley, 1989.
- ROTMANS, J.; KEMP, R.; VAN ASSELTt, M. 2001. More evolution than revolution: transition management in public policy. *Foresight*, 3 (1): 15–31.
- ROY, B. *Methodologie Multicritère d'aide à la Décision*. Paris: Editora Econômica, 1985.
- ROY, B. *Multicriteria Methodology for Decision Aiding*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- SAATY, T.L. 1980. *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill.
- SALMINEN, P. HOKKANEN, J.; LAHDELMA, R.. 1998. Comparing multicriteria methods in the context of environmental problems. *European Journal of Operational Research*, 104: 485-496.
- SHAPIRO, A. 2003. Monte Carlo Sampling Methods. In Ruszczynski, A.; Shapiro, A. (Ed). *Stochastic Programming*. Handbooks in OR & MS, Vol. 10, North-Holland Publishing Company, p. 353-425.
- SHEHABUDDEEN, N.; PROBERT, D.; PHAAL, R. 2006. From theory to practice: challenges in operationalising a technology selection framework. *Technovation*, 26:324–335.
- SHEN Y-C, CHOU CJ & LIN GTR. 2011. The portfolio of renewable energy sources for achieving the three E policy goals. *Energy*, doi:10.1016/j.energy.2011.01.053.
- SHENHAR, A. 1991. On system properties and systemhood. *International Journal of General Systems*, 18: 167–174.
- STIRLING, A. 2010. Multicriteria diversity analysis – A novel heuristic framework for appraising energy portfolios. *Energy Policy*, 38: 1622–1634.
- STREIMIKIENE, D.; ŠIVICKAS, G. 2008. The EU sustainable energy policy indicators framework. *Environment International*, 34: 1227–1240.
- TRAN, TA; DAIM T. 2008. A taxonomic review of methods and tools applied in technology assessment. *Technological Forecasting and Social Change*, 75:1396–405.
- TSOUSTOS, T.; DRANDAKI, M.; FRANTZESKAKI, N.; IOSIFIDIS, E.; KIOSSES, I. 2009. Sustainable energy planning by using multi-criteria analysis application in the island of Crete. *Energy Policy*, 37: 1587–1600.

- 
- TURKENBURG, WC. 2002. The Innovation Chain: Policies to Promote Energy Innovations. In: *Energy for Sustainable Development – A policy Agenda* [edited by TB. Johansson and J. Goldemberg], New York: United Nations Development Programme (UNDP), 137-172.
- UNITED NATIONS. 1998. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change.
- VARGAS, RV. Gerenciamento de Projetos: estabelecendo diferenciais competitivos. 6 Ed. Rio de Janeiro – Brasport, 2005.
- VETSCHERA, R.; ALMEIDA, A.T. 2012. A PROMETHEE-based approach to portfolio selection problems. *Computers & Operations Research*, 39(5): 1010-1020. doi: 10.1016/j.cor.2011.06.019.
- VINCKE, P. 1992. *Multicriteria decision-aid*. Bruxelles: John Wiley & Sons, Inc.
- WANG, J.; HWANG, W.-L. 2005. A fuzzy set approach for R&D portfolio selection using a real options valuation model. *The International Journal of Management Science*, v.35, p.247-257.
- WANG, J.J.; JING, Y-Y; ZHANG, C-F; ZHAO, J-H. 2009. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13: 2263–2278.
- YANG, S-C.; LIN, T-L; CHANG, T-J; CHANG, K-J. 2011. A semi-variance portfolio selection model for military investment assets. *Expert Systems with Applications*, 38: 2292–2301.
- ZELENY, M. 1982. *Multiple Criteria Decision Making*. New York: MacGraw-Hill.