

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA**

**SELEÇÃO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS
URBANOS: UMA ABORDAGEM COM A LÓGICA
DIFUSA**

TESE DE DOUTORADO

Alexandre Barin

Santa Maria, RS, Brasil

2012



SELEÇÃO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: UMA ABORDAGEM COM A LÓGICA DIFUSA

Alexandre Barin

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia, Centro de Estudos em Energia e Meio Ambiente (CEEMA) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Elétrica.**

Orientadora: Prof. Dra. Luciane Neves Canha
Co-orientador: Prof. Dra. Karine Faverzani Magnago
Co-orientador (exterior): Prof. Dr. Manuel Antônio Matos

Santa Maria, RS, Brasil

2012

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Tese de Doutorado

**SELEÇÃO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS:
UMA ABORDAGEM COM A LÓGICA DIFUSA**

elaborada por
Alexandre Barin

como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutor em Engenharia Elétrica

COMISSÃO EXAMINADORA:

Luciane Neves Canha, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientadora)

Daniel Pinheiro Bernardon, Dr.

Diego Berlezi Ramos, Dr.

Ghendy Cardoso Junior, Dr.

Jocemar Biasi Parizzi, Dr.

Santa Maria, 2012.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a minha esposa Elisandra, que esteve ao meu lado com seu amor e carinho, vibrou comigo nos momentos de vitória e sempre esteve disposta a ouvir e refletir sobre os meus desafios, me inspirando, de forma única, a seguir em frente.

Também gostaria de agradecer a meus pais e irmãos me apoiarem e acompanharem o meu desenvolvimento intelectual e pessoal ao longo deste doutorado.

Gostaria de agradecer a CAPES e a todos os colegas do grupo CEEMA da UFSM, em especial àqueles que trabalharam diretamente comigo. Agradeço também ao meu co-orientador do estágio de doutoramento Professor Manuel Antônio Matos e aos colegas que conheci no INESC-Porto, em Portugal.

Finalmente, gostaria de agradecer a Professora Luciane Neves Canha e a Professora Karine Faverzani Magnago, que se demonstraram ótimas conselheiras e confiaram desde o princípio na minha capacidade, proporcionando-me oportunidades excepcionais para minha evolução, não somente no aspecto profissional, mas também no pessoal.

*Welcome to where time stands still
No one leaves and no one will
Moon is full, never seems to change
Just labeled mentally deranged
Dream the same thing every night
I see our freedom in my sight
No locked doors, no windows barred
No things to make my brain seem scarred*
Sanitarium

*Halls of justice painted green
Money talking
Power wolves beset your door
Hear them stalking
Soon you'll please their appetite
They devour
Hammer of justice crushes you
Overpower
And justice for all*

*Those people who tell you not to take chances
They are all missing on what life is about
You only live once so take hold of the chance
Don't end up like others the same song and dance*
Motorbreath

*Hypnotizing power
Crushing all that cower
Battery is here to stay
Smashing through the boundaries
Lunacy has found me
Cannot stop the battery
Thrashing all deceivers
Mashing non-believers
Never ending potency
Battery*

RESUMO

Tese de Doutorado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Santa Maria

SELEÇÃO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: UMA ABORDAGEM COM A LÓGICA DIFUSA

AUTOR: ALEXANDRE BARIN

ORIENTADOR: LUCIANE NEVES CANHA

CO-ORIENTADOR: KARINE FAVERZANI MAGNAGO

Local e data da Defesa: Santa Maria, 2012.

A busca pelo desenvolvimento sustentável, em âmbitos sociais e ambientais, é um fator de extrema importância que incentiva a elaboração de várias pesquisas e projetos, como por exemplo, à aplicação de técnicas de gerenciamento e seleção de fontes alternativas renováveis de geração de energia. Dentre estas fontes, o aproveitamento energético do biogás resultante da decomposição de resíduos sólidos urbanos é um dos meios que propicia um desenvolvimento sustentável de forma mais completa. Para o devido aproveitamento de fontes alternativas renováveis, como a geração de energia elétrica e térmica a partir de resíduos sólidos urbanos, deve-se tomar como base métodos multicriteriais, considerando a existência de uma série de critérios para atender necessidades e interesses diversos quando se deseja selecionar tecnologias de geração e armazenamento de energia. A partir da utilização de métodos de ajuda a decisão é possível incorporar de forma clara as preferências dos agentes de decisão, obtendo como resposta final uma solução mais satisfatória e que pode ser corroborada através de validações heurísticas – discussões dos resultados junto aos agentes de decisão.

Mediante estes argumentos, o presente trabalho tem a finalidade de desenvolver uma metodologia de apoio a decisão para a seleção de sistemas para geração de energia elétrica com biogás proveniente de resíduos sólidos urbanos, avaliando devidamente cada processo decisório de acordo com aspectos econômicos, operacionais, ambientais e sociais. Para o alcance deste objetivo fez-se uso da lógica difusa baseada em regras e conjuntos fuzzy aplicados sobre diversos critérios, avaliando diferentes perspectivas. Os aperfeiçoamentos mais importantes apresentados na elaboração desta tese se referem à criação de uma etapa de relevância prévia aos critérios em análise, criação e seleção de meta-regras e forma de apresentação e construção de tais regras, facilitando o entendimento dos agentes de decisão para a avaliação do processo decisório e propiciando uma maior participação dos mesmos para obtenção de um resultado mais satisfatório. É possível observar ainda que os aperfeiçoamentos desenvolvidos permitiram a devida construção e averiguação das modelagens construídas.

No estudo de caso principal – aterro sanitário Caturrita II localizado na cidade de Santa Maria – é verificada a aplicabilidade da metodologia de ajuda a decisão desenvolvida visando a seleção da fonte de geração de energia elétrica mais apropriada a ser utilizada no aterro em questão.

Por fim, deve-se enfatizar que a partir dos aperfeiçoamentos alcançados durante o desenvolvimento desta tese, foi possível construir uma metodologia de ajuda a decisão genérica que pode ser aplicada não somente na seleção de sistemas de geração de energia em aterros, mas também na seleção de quaisquer sistemas de geração e armazenamento de energia, desde que todos os aspectos envolvidos no processo decisório sejam devidamente incorporados no problema em questão.

ABSTRACT

Doctoral Thesis
Post Graduation Program in Electric Engineering
Federal University of Santa Maria

AUTHOR: ALEXANDRE BARIN
TUTOR: LUCIANE NEVES CANHA
Santa Maria, 2012

Sustainability is becoming a major driving force in energy policy, leading to the development of different strategies and projects. Many of these strategies are related to the application of novel methodologies for selecting Renewable Energy Systems (RES) and energy storage systems. Electrical generation with biogas from municipal solid waste (MSW) is one of the main alternatives to concern all the conceptions of sustainability - social, economic and environmental constrains. The complexity of sustainability and energy planning makes the multicriteria analysis a valuable tool for the decision making process.

The use of an effective methodology for RES selection – a decision making process – is essential to guarantee the adequate energy management of the biogas and the MSW landfill. This methodology must be able to balance positive and negative aspects, achieving an overall solution that best satisfies the management needs. It is essential to deal with several parameters and concern the decision maker (DM) interaction over the decision making process. By applying the DM preferences into the development of the methodology, it is possible to corroborate the methodology outcome.

The presented thesis will therefore develop a novel methodology for selection of RES fuelled by biogas from MSW landfills. This methodology taking as basis fuzzy multi-rules and multi-sets to provide an accurate analysis of conflicting aspects - operational, economic, environmental, social, etc. These aspects are taken into account for each study case according to different perspectives adopted by the DMs.

The novel arrangements developed in this work are the creation of a previous classification of the priority criteria, the application of meta-rules and how to structure the fuzzy rules construction. The proposed arrangements have the purpose of easing the understanding of the methodology, as well as improving the DM interaction over the decision making process – achieving in this way a better solution.

This work presents the application of the novel decision making process to select the most appropriate energy source fuelled by biogas from MSW, considering the Caturrita II landfill located at Santa Maria City, Brazil.

In conclusion, it is important to emphasize that the novel software may be used in any energy system selection, for supplying or storage, according to the analysis of several criteria and perspectives for each regional circumstances, as well as particular management needs.

Keywords: Biogas. Decision making process. Renewable energy system. Fuzzy logic. Municipal solid waste landfill.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|-----|
| Figura 2.1 Ciclo completo do aproveitamento do biogás (Fonte: Willumsen, 2001)..... | 32 |
| Figura 2.2 Principais formas de produção de hidrogênio (Fonte: COBAS, 2006). | 39 |
| Figura 3.2 Componentes Fuzzy - Sistema Mamdani (Fonte: adaptado de Barros, 2006). | 51 |
| Figura 3.3 Controladores Fuzzy - Mamdani (acima) e Takagi-Sugeno (abaixo). Fonte: Software MATLAB®. | 52 |
| Figura 3.4 Método de Inferência do sistema Mamdani - Máximo dos Mínimos (Fonte: adaptado de ROSS, 2004). | 54 |
| Figura 3.5 Método defuzzificação - Centro de Gravidade (Fonte: Virant, 2000)..... | 56 |
| Figura 4.1 Variável Fuzzy padrão entrada e saída (Fonte: Software MATLAB®)..... | 64 |
| Figura 4.2 Comparativo referente a Modelagem 1 sem as meta-regras de aferição (Fonte: Software MATLAB®). | 72 |
| Figura 4.3 Comparativo da variação dos valores de entrada dos critérios A e B, sem Meta-regras de Aferição a esquerda e com Meta-regras de Aferição a direita (Fonte: Software MATLAB®). | 73 |
| Figura 5.1 Principais aspectos envolvidos no processo decisório em questão. | 76 |
| Figura 5.2 Variação do potencial de geração de energia elétrica ao longo dos anos no aterro sanitário Caturrita II (Fonte: Software BIOGAS)..... | 82 |
| Figura 1 Exemplo de análise multicriterial de forma hierárquica (Fonte: BARIN et al, 2009). | 126 |
| Figura 2 Variáveis Fuzzy para cada critério em análise – estudo de caso preliminar (Fonte: MATLAB®). | 138 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 2.1 – Utilização de fontes renováveis de energia no Brasil (Fonte: Atlas de Energia Elétrica - 3ª Edição)..... | 22 |
| Tabela 3.3 – Comparação entre os métodos de defuzzificação (DRIANKOV et al, 1996). | 55 |
| Tabela 4,1 – Efeitos da consequência de corte em uma base de regras (processo de inferência)..... | 60 |
| Tabela 4.2 – Base construtiva das regras de forma simplificada - Modelagem 1. | 70 |
| Tabela 5.1 – Base de dados utilizado na metodologia de ajuda a decisão – Estudo de Caso Principal..... | 84 |
| Tabela 5.2 - Entrada de dados na metodologia de ajuda a decisão – Estudo de Caso Principal. | 84 |
| Tabela 5.3 – Classificação final pela modelagem difusa - perspectivas da REVITA e da CONCESSIONÁRIA | 87 |
| Tabela 5.4 – Classificação final pela modelagem difusa - perspectivas da SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE e perspectiva conjunta REVITA e CONCESSIONÁRIA DE ENERGIA. | 87 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AD: Agente de decisão;

AHP: *Analytic Hierarchy Process*;

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica;

CER: Certificados de Emissões Reduzidas;

CL: classificação;

C.R.: razão de consistência;

CH₄: metano;

CO: monóxido de carbono;

CO₂: gás carbônico;

COS: carbonil sulfeto;

EF: eficiência;

ELECTRE: *Elimination and Choice Translating Reality*;

FC: célula a combustível (*fuel cell*);

FP: faixa de potência;

GD: geração distribuída;

H₂: hidrogênio;

H₂S: ácido sulfídrico;

Hz: Hertz (medição de frequência);

IA: impactos ambientais;

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística;

IPCC: Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas;

KOH: hidróxido de potássio;

MACBETH: *Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*;

MAT: maturidade tecnológica;

MCFC: *Molten Carbonate Fuel Cells*;

MCP: matrizes de comparação paritária;

MCT: Ministério da Ciência e Tecnologia;

MDL: Mecanismo de Desenvolvimento Limpo;

MT: microturbina;

NO₂: óxido nitroso;

PAFC: *Phosphoric Acid Fuel Cells*;

PESOS: determinação da importância aos critérios e alternativas (segundo Saaty);

PONTUAÇÕES: quantificação, em termos mensuráveis, na escala de 0 a 1, atribuídos pelos agentes de decisão apenas aos critérios qualitativos;

PIR: Planejamento Integrado de Recursos;
PR: prioridades relativas;
PRF: prioridades relativas finais;
PROINFA: Programa de Incentivo a Fontes Alternativas de Energia;
PNSB: Pesquisa Nacional de Saneamento Básico;
PNUMA: Programa das Nações Unidas Para o Meio Ambiente;
RES: sistemas renováveis de geração de energia (*renewable energy sources*);
R.I: índice aleatório apresentado por Saaty – método AHP.
RSU: resíduos sólidos urbanos;
rpm: rotações por minuto;
SA: serviços ancilares;
SES: acumulador de energia (*storage energy systems*);
SOFC: *Solid Oxide Fuel Cells*;
SO₂: dióxido de enxofre;
VID: vida útil;
TG: turbina a gás;
TV: turbina a vapor.

LISTA DE APÊNDICE

APÊNDICE A. Base de Regras completa e detalhada construída às Modelagens 1 e 2, e base de regras simplificada criada à Modelagem 3 (Original). Simulações do Estudo de Caso Principal com a Modelagem 2 e Modelagem 3.

APÊNDICE B. Estudo de caso preliminar: seleção de fontes de geração de energia - método AHP e lógica fuzzy.

APÊNDICE C. Análise dos resultados do método AHP, proposta por BANA.

APÊNDICE D. Questionário base aplicado aos agentes de decisão.

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Conceitualização Básica – Lixo, aterros e formação do biogás; protocolo de Kyoto e projetos MDL.

ANEXO B. Lista de publicações provenientes do uso da metodologia utilizada no estudo de caso Preliminar

SUMÁRIO

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 15 |
| 1.1 | Objetivos..... | 17 |
| 1.1.1 | Objetivo geral..... | 17 |
| 1.1.2 | Objetivos específicos..... | 17 |
| 1.2 | Organização e etapas do trabalho..... | 18 |
| 1.2.1 | Sinopse..... | 18 |
| 1.2.2 | Etapas de desenvolvimento desta tese..... | 18 |
| 2 | CONCEITOS BÁSICOS E A DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA..... | 21 |
| 2.1 | Fontes renováveis de energias..... | 21 |
| 2.2 | Biomassa e RSU..... | 23 |
| 2.3 | Incentivos a geração de energia elétrica com RSU – PROINFA e MDL..... | 25 |
| 2.4 | Estado da arte - geração de resíduos sólidos urbanos e a produção de energia elétrica 28 | |
| 2.5 | Tecnologias para geração de energia em aterros..... | 31 |
| 2.5.1 | Turbinas a Gás..... | 32 |
| 2.5.2 | Microturbinas..... | 33 |
| 2.5.3 | Motor ciclo Otto (grupo motor-gerador)..... | 34 |
| 2.5.4 | Motor Stirling..... | 36 |
| 2.5.5 | Ciclo Rankine (turbina a vapor)..... | 37 |
| 2.5.6 | Células a combustível..... | 38 |
| 2.6 | Considerações finais do capítulo 2..... | 42 |
| 3 | MÉTODOS MULTICRITERIAIS: APOIO A DECISÃO..... | 43 |
| 3.1 | Introdução a métodos multicriteriais..... | 43 |
| 3.2 | Histórico dos métodos de apoio à decisão..... | 43 |
| 3.3 | Estado da Arte – utilização de métodos multicriteriais no gerenciamento e seleção de sistemas de geração e armazenamento de energia..... | 45 |
| 3.4 | Lógica fuzzy (sistemas difusos ou nebulosos)..... | 50 |
| 3.4.1 | Fuzzificação (controladores fuzzy) e funções de pertinência..... | 51 |
| 3.4.2 | Inferência fuzzy..... | 53 |
| 3.4.3 | Defuzzificadores..... | 54 |
| 3.5 | Considerações finais do capítulo 3..... | 56 |
| 4 | A MODELAGEM DIFUSA..... | 59 |
| 4.1 | Aplicação inicial da metodologia de apoio a decisão baseada na modelagem difusa – suporte ao desenvolvimento dos aperfeiçoamentos..... | 59 |
| 4.2 | Avaliação e incorporação dos critérios a modelagem difusa..... | 61 |
| 4.2.1 | Participação dos agentes de decisão..... | 61 |
| 4.2.2 | Incorporação dos critérios quantitativos e qualitativos a modelagem desenvolvida..... | 62 |
| 4.3 | Descrição das principais etapas da modelagem difusa desenvolvida..... | 63 |
| 4.4 | Principais aspectos referentes a Modelagem 1..... | 68 |

| | | |
|-------|--|----|
| 4.4.1 | Base construtiva da modelagem 1 – regras e meta-regras | 69 |
| 4.4.2 | Análise gráfica da modelagem 1 | 71 |
| 4.5 | Considerações finais do capítulo 4 | 73 |
| 5 | ESTUDO DE CASO PRINCIPAL – METODOLOGIA DE AJUDA A DECISÃO NA SELEÇÃO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS | 75 |
| 5.1 | Considerações iniciais | 75 |
| 5.2 | Problemas decisórios e caracterização básica do processo decisório em questão | 76 |
| 5.3 | Interessados (<i>Stakeholders</i>) | 78 |
| 5.4 | Relações das alternativas e critérios | 78 |
| 5.5 | Potencial e período de geração de energia elétrica no aterro sanitário em questão . | 82 |
| 5.6 | Base de dados a ser aplicada na metodologia difusa proposta | 83 |
| 5.7 | Criação das perspectivas - etapa de relevância previa | 86 |
| 5.8 | Análise dos Resultados Finais | 86 |
| 5.9 | Comparação dos resultados entre as três modelagens desenvolvidas com a metodologia de ajuda a decisão difusa proposta | 88 |
| 5.10 | Considerações Finais do Capítulo 5 | 90 |
| 6 | CONCLUSÕES | 91 |
| 7 | PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS | 93 |
| 8 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 94 |

1 INTRODUÇÃO

A dispendiosa e ineficaz gestão dos resíduos sólidos urbanos (RSU) é um dos problemas mais relevantes da sociedade moderna, considerado o crescimento gradativo e desordenado da população. Impactos provenientes do inadequado gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos configuram uma considerável fonte de emissões de gases poluentes, além de estarem diretamente ligados as demais questões ambientais, como por exemplo: contaminação de cursos de água e lençóis freáticos e questões de saúde pública, principalmente em relação à veiculação de doenças. Questões econômicas e sociais, como a geração de energia elétrica a partir de RSU e a conseqüente produção de empregos e diminuição da quantidade de lixo armazenada, também são aspectos fundamentais a serem considerados para a melhoria no gerenciamento de RSU. Em se tratando de aspectos políticos, atualmente existe uma carência de uma política adequada para a viabilização do uso das tecnologias de aproveitamento energético de RSU no mercado brasileiro. A conjugação entre a iniciativa privada e pública poderia promover o aproveitamento energético do biogás gerado dos RSU, o que não somente contribui para a redução da emissão de gases poluentes e incentiva o uso de energias renováveis, mas também contempla o desenvolvimento sustentável.

É necessário enfatizar que a busca pelo desenvolvimento sustentável, em âmbitos sociais, econômicos e ambientais, é um fator de extrema importância que incentiva a elaboração de várias pesquisas e projetos, como por exemplo, a aplicação de mecanismos de gerenciamento e seleção de fontes alternativas renováveis de geração de energia. Estes mecanismos devem tomar como base métodos multicriteriais de ajuda a decisão, considerando a existência de uma série de critérios para atender necessidades e interesses diversos quando se deseja selecionar tecnologias renováveis de geração de energia elétrica. No entanto, o que acontece normalmente é a priorização na escolha por uma determinada tecnologia julgada apenas por uma única ótica, normalmente econômica, que nem sempre é favorável. Análises monocriteriais, que regem grande parte dos projetos de geração, devem ser substituídas por análises multicriteriais que permitam a avaliação e a satisfação de diversos critérios. Nestes casos, embora a melhor solução não seja atingida para um critério específico, ao final atinge-se uma solução mais satisfatória que tende a incorporar de forma

clara todos os aspectos envolvidos no processo decisório juntamente as preferências dos agentes de decisão (AD), em prol de uma análise global.

Mediante estes argumentos, o presente trabalho tem a finalidade de desenvolver e apresentar uma metodologia de apoio a decisão a ser aplicada para seleção de sistemas de geração de energia elétrica em aterros sanitários, avaliando com precisão cada caso em questão de acordo com aspectos econômicos, operacionais, ambientais e sociais. Para o alcance deste objetivo será utilizada a lógica difusa a partir da modelagem de regras e conjuntos fuzzy aplicados sobre diversos critérios, tomando como base diferentes perspectivas. No desenvolvimento da metodologia de apoio a decisão, a aplicação de relevância prévia aos critérios em análise, a criação e seleção de meta-regras, e ainda a forma de apresentação e construção de tais regras no formato “escada”, são contribuições significativas desenvolvidas nesta tese, facilitando o entendimento do AD para a análise do processo decisório e propiciando uma maior participação do mesmo para obtenção de um resultado mais satisfatório. Sem estes aperfeiçoamentos a modelagem de regras fuzzy para estudos de caso complexos, que envolvam diversos critérios, torna-se um processo extremamente trabalhoso que tende a propiciar erros de construção, como inconsistências e assimetrias indesejadas, impossibilitando ainda a corroboração dos resultados finais – validação heurística. Desta forma, pode-se verificar que os aperfeiçoamentos desenvolvidos permitiram a construção e averiguação das modelagens construídas.

A metodologia desenvolvida é tomada como base para a construção de uma metodologia genérica que pode ser utilizada na avaliação de diversos tipos de sistemas de geração e armazenamento de energia. Como estudo de caso principal, foi selecionado o aterro sanitário Caturrita II localizado na cidade de Santa Maria – RS, onde é verificada a aplicabilidade da metodologia de ajuda a decisão para a seleção de uma fonte de geração de energia elétrica de pequeno porte.

A aplicação da metodologia genérica pode-se dar na avaliação de quaisquer situações em que os agentes de decisão devem selecionar e justificar qual o melhor tipo de sistema a ser utilizado para uma determinada instalação (estudo de caso), de acordo com as necessidades de gerenciamento e a realidade local do estudo em questão.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver uma nova metodologia a ser aplicada para seleção de sistemas de geração de energia elétrica em aterros sanitários. No desenvolvimento da metodologia de apoio a decisão, a aplicação de relevância prévia aos critérios em análise, a criação e seleção de meta-regras e o formato de apresentação e construção de tais regras – processo denominado de “escada” – são as contribuições mais significativas desenvolvidas nesta tese, facilitando o entendimento do agente de decisão, propiciando uma maior participação do mesmo e ainda permitindo a corroboração final dos resultados obtidos – validação heurística.

A metodologia de ajuda a decisão desenvolvida é tomada como base para a construção de uma metodologia genérica que pode ser usada em diversos estudos de caso que consideram não apenas a seleção de tecnologias para geração de energia elétrica com biogás, mas também demais tecnologias de geração e armazenamento de energia.

1.1.2 Objetivos específicos

Apresentar o estado da arte sobre a geração de energia elétrica com biogás proveniente do tratamento de resíduos sólidos urbanos, assim como do estado da arte de metodologias multicriteriais existentes e, adicionalmente, utilizadas para a seleção de fontes de geração e armazenamento de energia elétrica.

Desenvolver estudos de caso com a finalidade de comparar e selecionar um determinado método multicriterial a ser utilizado como base para a construção de uma nova metodologia de ajuda a decisão.

Criar uma metodologia genérica que pode ser utilizada na avaliação de diversos tipos de sistemas de geração e armazenamento de energia.

Verificar a aplicabilidade da metodologia de ajuda a decisão desenvolvida visando a seleção da fonte de geração de energia elétrica mais apropriada no aterro sanitário Caturrita II localizado na cidade de Santa Maria.

1.2 Organização e etapas do trabalho

1.2.1 Sinopse

Este Capítulo apresenta a motivação e os objetivos, considerando o desenvolvimento deste trabalho e sua organização.

O Capítulo 2 apresenta as considerações e conceitos básicos relevantes ao desenvolvimento deste trabalho, assim como o Estado da Arte sobre a geração de energia elétrica com biogás proveniente do tratamento de resíduos sólidos urbanos.

O Capítulo 3 ilustra as metodologias multicriteriais existentes – introdução, histórico – assim como a possível aplicação das mesmas para a seleção de fontes de geração e armazenamento de energia elétrica (estado da arte).

O Capítulo 4 descreve os aprimoramentos estabelecidos a metodologia de ajuda a decisão para a avaliação do estudo de caso principal em questão. Desta forma, o foco do Capítulo é a criação da etapa de relevância prévia e das meta-regras, assim como a aplicação e relação dos mesmos com a base de regras desenvolvida no processo de inferência fuzzy.

O Capítulo 5 descreve os principais aspectos referentes ao processo decisório em questão – seleção da tecnologia mais apropriada para geração de energia elétrica no aterro sanitário Caturrita II localizado na cidade de Santa Maria. Além disso, serão identificados os principais interessados e a forma de participação dos mesmos para resolução do problema em questão. Por fim são apresentados e avaliados os resultados finais das três modelagens desenvolvidas com a metodologia de ajuda a decisão difusa proposta.

1.2.2 Etapas de desenvolvimento desta tese

Destacam-se as seguintes etapas na realização deste trabalho:

Estado da arte – Esta etapa teve como finalidade a obtenção de um embasamento teórico aprofundado sobre os sistemas de geração de energia elétrica a partir de RSU somado a um estudo minucioso dos métodos multicriteriais existentes utilizados para o gerenciamento e seleção de sistemas de geração e armazenamento de energia elétrica.

Simulações iniciais – Nesta etapa são propostos diferentes estudos de caso (Caso preliminar – Apêndice B, e artigos desenvolvidos – lista de publicações Anexo A),

considerando a análise de diversos tipos de tecnologias de geração e armazenamento com intuito de validar e aperfeiçoar o uso da metodologia de ajuda a decisão desenvolvida, junto à publicação de artigos.

Elaboração de artigos – Desde as primeiras etapas do desenvolvimento deste trabalho de doutorado foram propostas publicações de artigos em periódicos e eventos científicos.

Estágio no exterior (INESC PORTO / PORTUGAL) – Nesta etapa, foram adquiridos novos conhecimentos em métodos de ajuda de decisão a serem aplicados na área da avaliação de alternativas de geração energética, além da clarificação da importância dos agentes de decisão em problemas decisórios. A partir desta aprendizagem, foi possível aperfeiçoar o método de apoio a decisão proposto e acrescentando inovações propostas de forma coesa, focando como grande contribuição o desenvolvimento das meta-regras.

Coleta de dados – Levantamento de dados do aterro sanitário Caturrita II localizado em Santa Maria – RS. Esta etapa visa à aquisição de dados específicos referentes ao estudo de caso proposto.

Simulações com base nos dados provenientes do aterro Caturrita II. Esta etapa tem como objetivo avaliar as possibilidades de geração de energia no aterro, assim como propor o melhor sistema para futura geração de energia elétrica a partir de RSU coletados nesta área.

Defesa da Tese – Finalizado o processo de desenvolvimento das topologias e avaliações dos resultados obtidos, é apresentado a tese final de doutorado. Conclusões finais podem ser observadas no final desta tese.

2 CONCEITOS BÁSICOS E A DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

O Capítulo 2 apresenta as considerações e conceitos básicos relevantes ao desenvolvimento deste trabalho de doutorado, como a posição brasileira em relação ao uso de fontes renováveis de energia, conceitos essenciais sobre biomassa e resíduos sólidos urbanos e os incentivos governamentais a utilização dos mesmos.

Ainda neste Capítulo é exposto o estado da arte da geração de resíduos sólidos urbanos e a produção de energia elétrica seguido por descrições individuais minuciosas sobre as principais tecnologias que podem ser utilizadas para a geração de energia com biogás de RSU.

2.1 Fontes renováveis de energias

No passado, durante as crises de oferta do petróleo, várias fontes de energia renovável, até então economicamente inviáveis, tornaram-se mais atrativas. No Brasil foram desenvolvidos pequenos projetos de fontes de energia eólica, solar, de pequenas centrais hidroelétricas e de biomassa – mais especificamente do álcool de cana-de-açúcar para combustível veicular. Com a relativa estabilidade que o preço do petróleo alcançou a partir da metade da década de oitenta, houve uma diminuição ou paralisação no desenvolvimento de fontes de energias alternativas. Mundialmente, a partir de meados da década de noventa, com o desenvolvimento de estudos científicos sobre os impactos causados ao meio ambiente, somada ao surgimento de estudos prevendo a futura escassez dos combustíveis fósseis (HINRICHS e KLEINBACH, 2009), percebeu-se que a utilização de fontes alternativas e, principalmente, renováveis de energia, é essencial para a obtenção de desenvolvimento sustentável, visando um equilíbrio econômico, social e ambiental (CÓRMIO et al, 2003). Mesmo perante a nova crise econômica global registrada no fim do ano de 2008, que ocasionou uma redução mundial nos investimentos em fontes alternativas de geração de energia, observa-se que o aproveitamento de fontes renováveis de energia continua a crescer,

tendo em vista uma maior conscientização provinda do estabelecimento do protocolo de Kyoto - 1997. Ainda, pode-se observar a mobilização de muitas das principais economias mundiais (países desenvolvidos e em desenvolvimento) para o mantimento, ou ascensão, da redução das emissões dos gases poluentes na Conferência de Copenhague - 2009.

Em se tratando do atual momento do setor elétrico brasileiro, verifica-se que a inserção de fontes descentralizadas de geração de energia elétrica apresenta-se como uma alternativa estratégica para o desenvolvimento do sistema energético (LORA e HADDAD, 2006). Sistemas de geração de energia baseados em fontes primárias renováveis, fazendo uso do biogás, por exemplo, são consideradas tecnologias ecologicamente amigáveis e com incentivos governamentais para a sua difusão; no caso do Brasil há incentivos estabelecidos pelo PROINFA – Programa de Incentivo a Fontes Alternativas de Energia (PROINFA, Lei 10.438/2002). Em 2009, muitos países – inclusive o Brasil – mantinham programas oficiais para expansão das fontes renováveis de energia, iniciados já há alguns anos.

No caso do Brasil, o uso de fontes renováveis de energia está amplamente focalizado em centrais hidrelétricas – Tabela 2.1. Segundo o Banco de Informações de Geração (ANEEL), em novembro de 2008, estavam em operação no país 159 usinas hidrelétricas (74632 MW – correspondente a 71% da energia elétrica gerada), 227 centrais geradoras hidrelétricas (120 MW – 0,11%) e 320 PCHs (2400 MW – 2,3%). Por outro lado, o aproveitamento das demais fontes renováveis é consideravelmente baixo com 17 usinas eólicas (272 MW – 0,26%), apenas um empreendimento fotovoltaico (20 kW) e 302 termelétricas movidas a biomassa (5700 MW – 5,4%), sendo três destas usinas abastecidas por biogás cuja matéria-prima é a biomassa obtida em aterros sanitários.

Tabela 2.1 – Utilização de fontes renováveis de energia no Brasil (Fonte: Atlas de Energia Elétrica - 3ª Edição)

| | Quantidade | Potência MW | % de geração elétrica |
|-------------------------------------|------------|-------------|-----------------------|
| Hidrelétricas | 159 | 74632 | 71 |
| C.G. Hidrelétricas | 227 | 120 | 0,11 |
| PCHs | 320 | 2400 | 2,3 |
| Eólicas | 17 | 272 | 0,26 |
| Fotovoltaicas | 1 | 0,02 | 0 |
| Termelétricas biomassa | 302 | 5700 | 5,4 |
| Termelétricas em aterros sanitários | 3 | 60 | 0,05 |

Observa-se que a atitude de priorização de hidroelétricas no Brasil é justificada pela hidrologia propícia a implementação destes sistemas que pode ser encontrada ao longo de quase todo território brasileiro. No entanto, a ampliação do uso de demais fontes renováveis de energia, como o aproveitamento do biogás proveniente de resíduos sólidos urbanos, é essencial para a diversificação da matriz energética, para a inserção de fontes descentralizadas de geração de energia, assim como para a devida busca por um desenvolvimento sustentável.

2.2 Biomassa e RSU

A biomassa é uma das fontes para produção de energia com maior potencial de crescimento nos próximos anos. Tanto a nível internacional (LANTZ et al, 2007) quanto nacional (LORA e ANDRADE, 2009), a biomassa é considerada uma das principais alternativas para a diversificação da matriz energética e a consequente redução da dependência dos combustíveis fósseis. A capacidade instalada de geração elétrica a partir de biogás no mundo no ano de 2008 foi de aproximadamente 52 GW (WIESE et al, 2009).

Em se tratando dos conceitos básicos da biomassa, pode-se descrevê-la como qualquer matéria orgânica que possa ser transformada em energia mecânica, térmica ou elétrica. De acordo com a sua origem, pode ser dividida em três classes: sólida, líquida e gasosa (BIOMASSA BRASIL, 2008).

A biomassa sólida tem como fonte os produtos e resíduos da agricultura (incluindo substâncias vegetais e animais), os resíduos das florestas e a fração biodegradável dos resíduos industriais e resíduos sólidos urbanos. Com relação aos produtos florestais, o carvão vegetal é largamente utilizado. O Brasil é o maior produtor mundial desse insumo energético considerando a elevada aplicação do carvão vegetal no meio industrial brasileiro. Todavia, o aproveitamento de resíduos da pecuária e de resíduos sólidos urbanos no Brasil pode ser considerado quase nulo em comparação ao potencial destas fontes no suprimento energético (BIOMASSA BRASIL, 2008).

A biomassa líquida existe em uma série de biocombustíveis líquidos, tais como: biodiesel obtido a partir de óleos provenientes de vegetais oleaginosas; etanol produzido com a fermentação de hidratos de carbono (açúcar, amido, celulose); e metanol gerado pela síntese do gás natural. Com relação ao uso de óleos, o Brasil dispõe de uma grande diversidade de espécies vegetais oleaginosas das quais se pode extrair óleos para fins energéticos. Em se

tratando do etanol, devido à grandeza dos números do setor sucroalcooleiro no Brasil, não se pode abordar a cana-de-açúcar apenas como mais um produto, mas sim como a principal fonte de biomassa energética utilizada no Brasil.

A biomassa gasosa é encontrada nos efluentes agropecuários provenientes da agroindústria e do meio urbano. A utilização da biomassa sólida em biodigestores, por exemplo, resulta na produção de biomassa gasosa (biogás). Sua produção também ocorre em aterros de RSU (resíduos sólidos urbanos). Este gás é resultado da degradação biológica anaeróbia da matéria orgânica, sendo constituído por uma mistura de metano e gás carbônico.

O poder calorífico do biogás varia de 5000 a 7000 Kcal/metro cúbico (FARRET, 2010), decorrente da maior ou menor pureza, ou seja, maior ou menor quantidade de metano. Um metro cúbico de biogás equivale a aproximadamente: 0,613 L de gasolina; 0,579 L de querosene; 0,553 L de óleo diesel; 0,790 L de álcool hidratado; 1,428 kW de eletricidade.

De acordo com o Banco de Informações de Geração (ANEEL), em novembro de 2008 existiam 302 termelétricas movidas a biomassa no país, que correspondem a um total de 5700 MW instalados. Do total de usinas relacionadas, 13 são abastecidas por licor negro (resíduo da celulose) com potência total de 944 MW; 27 por madeira (232 MW); três por biogás (45 MW), sendo duas por biogás de aterros; quatro por casca de arroz (21 MW) e 252 por bagaço de cana (4000 MW). Uma das características desses empreendimentos é o pequeno porte em potência instalada, o que favorece a instalação nas proximidades dos centros de consumo e de suprimento.

Em se tratando mais especificamente do uso da biomassa de resíduos sólidos urbanos (RSU), a dispendiosa e ineficaz gestão destes resíduos é um dos problemas mais relevantes da sociedade, considerando o crescimento gradativo e desordenado da população e de consumo de bens popularizados pelo aumento da produção industrial (ESCOSTEGUY, 2003 apud LANDIM, 2008). De acordo com levantamento que embasou a Política Nacional de Resíduos Sólidos, aprovada em agosto de 2010 pelo Congresso Nacional (Lei N° 12.305/2010), das mais de 150 mil toneladas de resíduos sólidos produzidos nos municípios do Brasil diariamente, 59% são depositadas em lixões (onde há lançamento de resíduos a céu aberto) e apenas 13% do lixo têm destinação correta, em aterros sanitários.

Segundo o *Key World Energy Statistics 2008* (ANEEL, 2008), a biomassa e o lixo (urbano e industrial) responderam por 10,1% da produção energética mundial em 2006. No Brasil, os dois principais sistemas de geração de energia elétrica a partir do uso do biogás proveniente de RSU estão em operação no estado de São Paulo. O aterro sanitário Bandeirantes possui capacidade instalada de 22 MW, fazendo uso de 20 grupos motor-gerador

do tipo OTTO para a geração de energia. O aterro sanitário São João possui potência instalada de 24,6 MW, composta por 16 grupos motor-gerador do tipo OTTO com 1,54 MW cada. Ainda, como sistemas de geração de grande porte, podem ser citados: aterro SOLVI / Bahia – 19,73 MW; aterro Nova Iguaçu / RJ – 10 MW; aterro da Cariacica / ES – 11 MW; aterro Mauá / SP – 10 MW (JUCÁ, 2010). Com relação a sistemas de menor porte, aterro de Belo Horizonte / MG – 5,5 MW (AMDA, 2010) e aterro de Uberlândia / MG – 2 MW (ENGESERT, 2010).

2.3 Incentivos a geração de energia elétrica com RSU – PROINFA e MDL

Em se tratando de aspectos políticos, atualmente existe carência de uma política adequada para a viabilização do uso das tecnologias de aproveitamento energético de RSU no mercado brasileiro. Embora o governo brasileiro tenha criado o Programa de Incentivos a Fontes Alternativas de Energia (PROINFA, Lei N° 10.438/2002), onde também foi contemplada a compra da eletricidade a partir do biogás de aterro sanitário, poucos projetos foram apresentados (LÈBRE LA ROVERE, 2005). A geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do tratamento de resíduos sólidos urbanos deveria possuir caráter prioritário no país por questões ambientais, sociais e de saúde pública.

Em Bancor (2003) pode-se encontrar algumas sugestões de modificação e aprimoramento do PROINFA considerando a entrada de fontes de geração de energia a partir do biogás. Dentre elas, têm-se:

- reservar uma cota inicial para fontes de geração empregando biogás como combustível, produzido por aterros sanitários, devido a inclusão do processo de saneamento básico;
- garantir formalmente o pagamento dos preços e valores contratados pela geração, como forma líquida e certa;
- adotar uma gestão dos títulos a serem emitidos no futuro, pelos créditos de carbono – se for o caso – referentes a cada empreendimento PROINFA.

Para tentar suprir esta carência ao aproveitamento energético de RSU, em agosto de 2010 foi instituída a Política Nacional de Resíduos Sólidos – LEI N° 12.305/2010. Dois princípios que são destacados no *Art. 6* da Política Nacional de Resíduos Sólidos:

IV - o desenvolvimento sustentável;

VI - a cooperação técnica e financeira entre os setores público e privado para o desenvolvimento de pesquisas de novos produtos, métodos, processos e tecnologias de gestão, reciclagem, reutilização, tratamento de resíduos e disposição final ambientalmente adequada de rejeitos;

Como já dito anteriormente, a conjugação entre a iniciativa privada e pública poderia promover o crescimento no aproveitamento energético do biogás gerado de RSU, contribuindo ao denominado desenvolvimento sustentável.

Ainda em relação a Política Nacional de Resíduos Sólidos, no Art. 7º desta Lei destacam-se como objetivos “*a adoção, desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias limpas como forma de minimizar impactos ambientais*”. Desta forma, “*poderão ser utilizadas tecnologias visando à recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos, desde que tenha sido comprovada sua viabilidade técnica e ambiental*”.

Embora na Lei Nº 12.305 não exista qualquer menção sobre as obrigações de coleta de biogás nos aterros, o que alavancaria o processo de geração de energia elétrica, O Art. 42. (VII) desta Lei descreve que “*o poder público poderá instituir medidas indutoras e linhas de financiamento para atender, prioritariamente, às iniciativas de desenvolvimento de pesquisas voltadas para tecnologias limpas aplicáveis aos resíduos sólidos*”.

Segundo Henriques (2004), partindo da premissa que num futuro próximo existirão regulamentações que obrigarão os aterros sanitários a coletar e queimar o biogás, os operadores de aterros terão a responsabilidade de arcar com os custos de instalação e manutenção de um sistema de coleta. Ainda, segundo Muylaert (2000), países industrializados como Estados Unidos e os países do Reino Unido possuem regulamentações governamentais que exigem que aterros sanitários coletem suas emissões de metano (biogás). A tendência é que essas regulamentações sejam crescentemente implantadas, tanto em países desenvolvidos quanto nos países em desenvolvimento. A partir disso, o proprietário/operador do biogás proveniente do aterro seria obrigado a optar por queimar o gás em *flares*, ou produzir energia para uso próprio ou venda. A geração de energia poderia possibilitar uma auto-suficiência à operação do aterro.

Quando as condições locais do aterro forem favoráveis, o empreendimento poderá trazer lucros, inclusive fazendo uso do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL – Protocolo de Kyoto, Anexo A). Para a implantação de um projeto no âmbito do MDL, um aterro sanitário deve atender alguns requisitos mínimos, de forma a não causar danos à saúde pública e nem à segurança da comunidade do entorno, além de minimizar os impactos ambientais relacionados às atividades de disposição dos resíduos. Em setembro de 2008, a

prefeitura de São Paulo arrecadou cerca de R\$ 37 milhões no segundo leilão de créditos de carbono, obtidos com a captação de gás metano nos aterros Bandeirantes e São João. Foram comercializados em leilão na Bolsa BM&F Bovespa 713 mil créditos de carbono, ou Reduções Certificadas de Emissões (RCEs). O preço final de venda, de € 19,20 por crédito, embutiu ágio superior a 35% sobre o preço mínimo de € 14,20 da abertura do leilão. No primeiro leilão de créditos de carbono já haviam sido arrecadados R\$ 34 milhões, depositados no Fundo Municipal de Meio Ambiente, e investidos em projetos de saneamento, de combate a enchentes, de urbanização de favelas, ampliação de áreas verdes, entre outros. Novamente enfatizando a necessidade de maiores incentivos nacionais ao aproveitamento de RSU, durante a conferência de Copenhague, em dezembro de 2009, o governo brasileiro apresentou índices de redução de 36 a 39% de emissões até o ano de 2020 – destes, o maior percentual – 25% – envolve a redução do desmatamento e reflorestamento. Com relação ao uso de fontes renováveis, foi proposta a construção de novas hidrelétricas, correspondente a 3,5%, e apenas 1% dos 39% de redução foi vinculado adoção de novas fontes de energia. Destes insignificantes 1%, estaria planejado um aumento nas usinas termoelétricas a cana e um aumento na utilização de aerogeradores. Nada foi citado sobre biogás de dejetos de animais ou sobre o aproveitamento do gás de RSU (BARIN et al, 2010).

Embora a prefeitura de São Paulo tenha arrecadado uma considerável quantia com os leilões de créditos de carbono, é interessante observar que o Protocolo de Kyoto, que ainda hoje é o responsável pelos incentivos, não considera a sustentabilidade de forma correta para diferenciação na seleção de projetos MDL. Estes projetos são incentivados somente em relação à redução das emissões de gases nocivos ao meio ambiente, sem qualquer outra consideração. Desta forma, aterros sanitários de pequeno porte, que poderiam gerar, por exemplo, até 5 MW, dificilmente receberiam incentivos pela venda de créditos carbono. Outra importante questão a ser discutida é a ampliação dos incentivos promovidos pelo protocolo de Kyoto, que, se não forem estendidas por futuras negociações, tendem a terminar no ano de 2012.

Para promover o incentivo de fontes renováveis como o biogás proveniente do tratamento de RSU deve-se ter noção do significado do termo desenvolvimento sustentável – ou sustentabilidade, assim como da dimensão de sua importância. A sustentabilidade é um conceito que alia crescimento, consumo consciente, preservação do meio ambiente e melhoria da qualidade de vida. É o desenvolvimento capaz de suprir as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade de atender as necessidades das futuras gerações. Em outras palavras, a sustentabilidade pode ser definida como o equilíbrio entre benefícios econômicos,

ambientais e sociais. O aproveitamento do biogás de RSU propicia uma sustentabilidade clara e completa. Como aspectos econômicos há a viabilização de um sistema de geração auto-suficiente com possibilidade de venda de excedente de energia. Ainda, através do aproveitamento de energia térmica é possível reduzir custos de tratamento de chorume – no caso de uso da técnica por evaporação – ou aproveitar esta energia térmica para demais processos industriais. Como aspectos ambientais há, além da redução de gases nocivos, o melhoramento das condições de deposição final dos RSU – etapa essencial para a implementação do sistema de geração de energia – evitando a contaminação dos lençóis freáticos pelo vazamento de chorume e redução do mau cheiro – normalmente constatados em lixões. Ainda, pode-se citar a obrigação de reciclagem para melhor aproveitamento da matéria orgânica. E como aspectos sociais, além da ponderação dos três últimos benefícios relacionados a questões de saúde pública e a geração de empregos, há a compactação e utilização de milhares de toneladas de lixo que são diariamente despejadas em aterros em todo Brasil, sendo que o depósito inadequado destes dejetos é um dos problemas mais relevantes para a sociedade.

2.4 Estado da arte - geração de resíduos sólidos urbanos e a produção de energia elétrica

Impactos provenientes do inadequado tratamento dos resíduos sólidos urbanos estão diretamente ligados a questões ambientais, como as emissões de gases poluentes, contaminação de cursos de água e lençóis freáticos, e conseqüentemente, a questões de saúde pública, principalmente em relação à veiculação de doenças. A análise de questões econômicas e sociais, como a geração de energia elétrica a partir de RSU e a conseqüente geração de empregos e diminuição da quantidade de lixo armazenada, também são aspectos fundamentais a serem considerados para a melhoria no gerenciamento de RSU. Em Hokkanen e Salminen (1995) e Fiorucci et al (2003) são avaliados aspectos técnicos e econômicos para o gerenciamento de RSU, onde também são considerados os prováveis benefícios sociais e ambientais a partir da geração de energia elétrica em aterros sanitários.

Existem vários tipos de tecnologias para geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do tratamento de RSU. Dentre as principais, podem ser destacadas: turbinas a gás, microturbinas, turbinas a vapor, motores de combustão interna (grupo motor gerador), células a combustível. O uso mais simples do biogás de RSU é como um combustível de

médio BTU para caldeiras ou para uso em processos industriais (por exemplo: operações de secagem, operações em fornos, produção de cimento e asfalto). A geração elétrica é uma opção vantajosa porque produz valor agregado para o biogás de aterro.

A eficiência da geração elétrica isolada varia de 20% a 50% (SHRESTHA e NARAYANAN, 2008). Com o uso da cogeração obtêm-se eficiências mais altas pela disponibilização do vapor resultante do processo de geração que pode ser usado localmente para aquecimento, refrigeração e outras necessidades de processo industrial (TOLMASQUIM, 2003 apud LANDIM, 2008 apud OLIVEIRA, 2003). Outra possibilidade é venda de gás de qualidade através de gasodutos com a depuração do biogás para um produto de alto BTU (como o gás natural). Por causa do seu alto custo capital, essa opção só pode ser viável para aterros sanitários com substancial recuperação de gás, isto é, pelo menos 113000 m³/dia (MUYLAERT 2000 apud LANDIM 2008). Essa aplicação requer um elevado tratamento de gás para remover CO₂ e impurezas relativamente intensivas.

Deve-se enfatizar que a partir do uso e do desenvolvimento de melhores formas de tratamento e aproveitamento dos resíduos sólidos urbanos, empresas que investirem neste setor poderiam se beneficiar das seguintes maneiras:

- obter receita pela venda de compostos orgânicos e de recicláveis (papel, vidro, plástico, latas de alumínio e aço);
- obter receita com a taxa de recepção do lixo da prefeitura;
- obter concessão para períodos longos (vários anos, considerando a vida útil do aterro sanitário em questão);
- obter receita pela venda de energia elétrica.

No Brasil, as três maiores usinas termelétricas movidas a biogás proveniente de aterros, conectadas a sistemas de distribuição de energia elétrica, fazem uso de motores de combustão interna, que possuem elevadas taxas de emissão de gases poluentes. A primeira delas, inaugurada em 2003 no estado de São Paulo, dentro do aterro sanitário Bandeirantes, possui capacidade instalada de 22 MW; a usina São João, também em São Paulo com capacidade instalada de 24,6 MW; e o aterro sanitário da empresa SOLVI localizado na Bahia com capacidade de 19,73 MW.

Estes sistemas demonstram o potencial de produção de energia que pode ser desenvolvido a partir do gerenciamento de aterros sanitários visando à geração elétrica com o uso do biogás. Ainda, o uso de outras tecnologias que possuam menor nível de emissão de gases poluentes poderia proporcionar, além da redução dos impactos ambientais, a elevação do retorno financeiro a partir do aumento de créditos carbonos adquiridos – Projetos MDL

(SACHS, 2007). A adequada inserção de uma fonte descentralizada com potência de 20 MW, por exemplo, em um sistema de distribuição de energia pode, além de atender centenas de consumidores, proporcionar inúmeros benefícios econômicos e operacionais a este sistema. Mesmo sistemas de geração de menor porte possuem ampla capacidade de gerar tais benefícios, além de possibilitar a auto suficiência energética do aterro sanitário, melhoramentos nos níveis de tensão dos consumidores atendidos, diminuição de perdas de energia elétrica, assim como a possibilidade de prestação de serviços ancilares (DUGAN e MACDERMOTT, 2001), (DUGAN e PRICE, 2004).

Em âmbitos mundiais, pode-se ser verificada a aplicação de diversas tecnologias para a geração de energia elétrica com o biogás de RSU. Desde a década de noventa já é possível encontrar a aplicação destas tecnologias, como no caso do uso de células a combustível do tipo PAFC de 200 kW em um aterro sanitário nos EUA (SPIEGEL et al, 1997) e (SPIEGEL et al, 1999). Em relação a projetos de maior porte, pode ser verificado o aterro sanitário “Biovale Company landfill” na França com 6,2 MW de potência gerada (DUCON et al, 2009). Em Portugal, há sistemas como o aterro na cidade de Porto (LIPOR, 2004) onde dois grupos motor-gerador ciclo OTTO, totalizando 1,9 MW de potência, são utilizados para tornar o aterro auto-suficiente, possibilitando ainda a venda de excedentes de energia.

Nos EUA, podem ser encontrados sistemas com maior porte que fazem uso do biogás de RSU. Na Califórnia, no aterro “Puente Hills” são gerados 50 MW por meio de uma termelétrica a vapor (SPOKAS et al, 2006).

Ainda segundo Spokas, no ano de 2006 já existiam mais de 1100 projetos de aproveitamento de biogás em aterros por todo mundo, incluindo aproximadamente 180 na Alemanha, 150 no Reino Unido, 135 na Itália e mais de 350 nos EUA (SPOKAS et al, 2006). É possível encontrar ainda diversos estudos na literatura sobre a viabilidade prática de implementação de tecnologias para geração de energia elétrica em aterros, tanto em países desenvolvidos (SPIEGEL e PRESTON, 2003), (MCKENNA, 2003), (SHRESTHA e NARAYANAN, 2007), (URBAN et al, 2009), como em países em desenvolvimento (WANG et al, 2009), (GALVÃO et al, 2001), (ALVES e CARDOSO FILHO, 2009), (LANDIM e AZEVEDO, 2008).

A partir das argumentações descritas acima, percebe-se que formas de gerenciamento e aproveitamento de RSU são instrumentos essenciais, não somente para o desenvolvimento técnico e econômico, mas também rumo ao desenvolvimento sustentável, considerando aspectos de relevância social e ambiental (SACHS, 2007), (CAIXETA, 2005). Para o alcance de um desenvolvimento sustentável também é fundamental a verificação da viabilidade

técnico-econômica do aproveitamento energético de RSU. O conhecimento das características operacionais das tecnologias de aproveitamento energético de resíduos se faz necessário e, sobretudo, a viabilidade econômico-ambiental da geração de biogás com a análise destas diferentes tecnologias de geração de energia elétrica.

Ainda, para o crescimento do aproveitamento energético de RSU, projetos de P&D com estudos de viabilidade dos RSU para a geração de energia elétrica devem ser constantemente desenvolvidos proporcionando aos principais interessados ao processo decisório as devidas ferramentas e informações para seleção das possíveis tecnologias para disposição e aproveitamento dos resíduos sólidos.

2.5 Tecnologias para geração de energia em aterros

Tendo como objetivo principal desta tese a seleção de sistemas de geração de energia elétrica a partir de RSU, antes de descrever cada uma das principais tecnologias que podem fazer uso de biogás proveniente de aterros, é interessante ter uma noção dos componentes básicos existentes dentro de um aterro para o aproveitamento energético. Primeiramente, há o sistema de captação de biogás do aterro sanitário que é composto por uma malha de drenos verticais e horizontais tendo, em sua superfície, uma conexão com uma rede de captação de biogás (tubulações normalmente de polietileno de alta densidade, distribuídos pela área do aterro na forma de espinha de peixe). Por fim, há uma estação de biogás, onde estão instalados os condensadores, sopradores, queimadores, sistema de controle e medição do biogás produzido (ZULAUF, 2004). Um bom exemplo que ilustra um ciclo completo do aproveitamento do biogás em diferentes possibilidades pode ser observado na Figura 2.1.

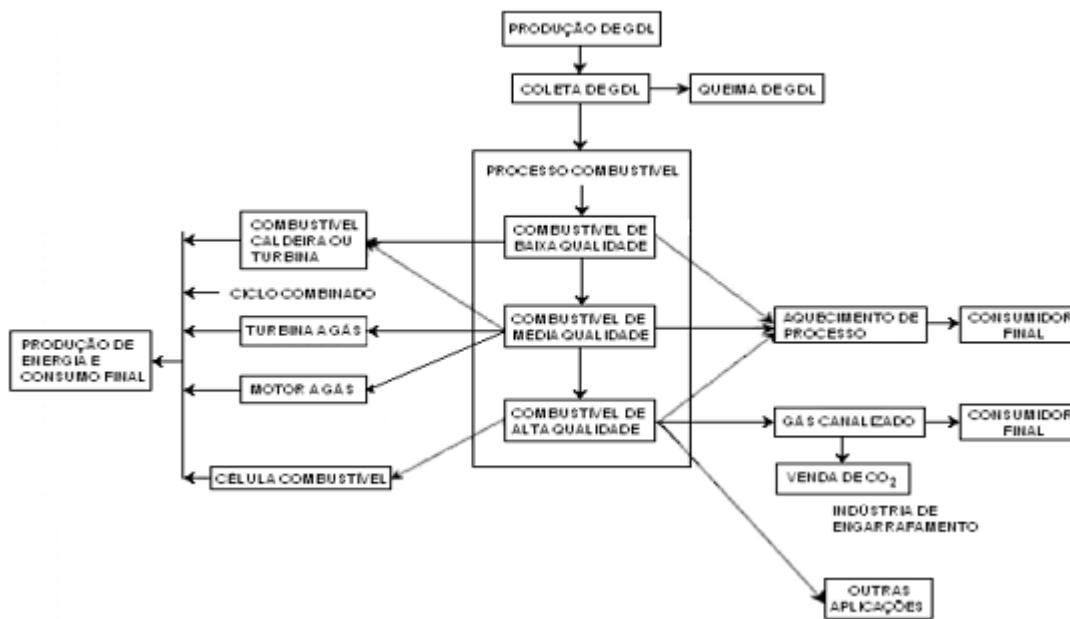


Figura 2.1 Ciclo completo do aproveitamento do biogás (Fonte: Willumsen, 2001).

2.5.1 Turbinas a Gás

As turbinas a gás operam com base no ciclo termodinâmico de Brayton no qual o ar atmosférico é comprimido, aquecido, misturado com combustível e então expandido. As turbinas a gás podem ser classificadas de acordo com o ciclo de operação em ciclo fechado e ciclo aberto, sendo o último, o mais comum. No modo aberto o fluido de trabalho é comprimido (no compressor) elevando-se a pressão. Este processo não tem nenhum calor adicionado, visto que o compressor em condições ideais opera em regime adiabático, fazendo com que o trabalho de compressão aumente a temperatura do ar. O ar entra na câmara de combustão e, em contato com o combustível, reage, iniciando o processo de queima. Os gases resultantes da combustão à elevada temperatura expandem-se na turbina gerando energia mecânica, além de acionar o compressor. O trabalho útil produzido é calculado pela diferença entre o trabalho da turbina e o consumido pelo compressor. No ciclo fechado os gases que deixam a turbina passam por um trocador de calor, fornecendo calor ao ar aspirado do compressor à câmara de combustão (MORAN e SHAPIRO, 2002).

Em se tratando do biogás proveniente do tratamento dos RSU, a turbina a gás faz uso do processo de gaseificação de biomassa através da queima dos materiais combustíveis ricos em carbono, junto com oxigênio e vapor da água, para produzir gás de síntese. Essa mistura

combustível de gases alimenta a câmara de combustão de turbina a gás, acoplada a um gerador de energia elétrica. Ainda, pode-se fazer uso da cogeração para processos industriais relacionados com cada caso, especificamente.

Com relação à faixa de potência de operação, a menor capacidade de uma turbina a gás disponível no mercado atualmente é de 30 kW e a maior em torno de 20 MW. A aplicação de turbinas a gás com o aproveitamento energético de biogás pode ser encontrada em (SCS ENGINEERS, 1997), ou ainda associada a outros sistemas como no artigo escrito por Korobitsyn (1999).

2.5.2 Microturbinas

Microturbinas são turbinas de pequeno porte, caracterizadas pela presença de um trocador de calor que opera com base no ciclo termodinâmico de Brayton (TERMODINÂMICA, 2007) no qual o ar atmosférico é comprimido, aquecido, misturado com combustível e então expandido. Os modelos mais utilizados são compostos por um pequeno motor (JET) integrado com um gerador de energia, possuindo apenas uma parte móvel (coluna) composta por um gerador localizado em uma de suas extremidades, uma turbina (rotor) na extremidade oposta, e um compressor (SOARES, 2007). Por fim há um recuperador de calor que desvia parte do ar quente que seria desperdiçado para alimentar o compressor, ou seja, é utilizado um ar aquecido (maior que a temperatura ambiente) para manter o ciclo de Brayton, economizando combustível no processo de compressão.

A partir disso, o compressor aspira (bombeia) ar para um combustor onde o combustível injetado e o ar comprimido se misturam, resultando em uma expansão rápida do gás (combustão), girando a turbina em alta velocidade de rotação. A velocidade alcançada é de aproximadamente 100.000 rpm, sendo que não só a turbina gira em alta velocidade como também o gerador. Assim, temos como resultado uma saída de alta frequência (aproximadamente 1600 Hz) convertida eletronicamente, através de uma interface, para frequência e tensão compatíveis ao sistema.

Com relação à faixa de potência de operação, denominam-se microturbinas as turbinas com capacidade entre 30 kW e 500 kW, embora comercialmente ainda não sejam encontradas microturbinas superiores a 400 KW (SOARES, 2007).

Um ótimo exemplo da aplicação prática das microturbinas está localizado em Los Angeles (EUA), onde cinquenta microturbinas do tipo C30 são alimentadas por gás derivado

de um reservatório de lixo (*Flare*). Combinadas, estas cinquenta microturbinas geram mais de 1,5 MW para o departamento de água e de rede de energia de Los Angeles.

Mesmo sendo um sistema de grande escala, onde poderia ser implementado um número muito menor de turbinas de maior porte, a grande vantagem neste caso é que a microturbina queima o gás, utilizado em seu processo de combustão, mesmo que este contenha um índice relativamente baixo de metano (35%), não necessitando da adição de qualquer outro combustível (mistura) à microturbina, o que resultaria em um gasto excessivo. Além disso, deve-se observar que a baixa emissão de gases poluentes é outro importante aspecto a ser considerado neste tipo de sistema.

No Brasil, a estação de tratamento de esgoto da cidade de Barueri, região da Grande São Paulo, possui uma microturbina Capstone de 30 kW de potência para geração de energia elétrica a partir do biogás.

Dentre as principais características das microturbinas, têm-se:

- pequeno porte alocadas facilmente, externa ou internamente;
- faixa de potência: 30 e 400 kW;
- flexibilidade com a utilização de diferentes combustíveis: uso de gases como propano, gás natural, biogás; ou combustíveis líquidos como querosene e diesel;
- baixa emissão de gases poluentes como óxido de nitrogênio (NO₂), dióxido de enxofre (SO₂) e monóxido de carbono (CO);
- maior confiabilidade para o sistema, proporcionando um fornecimento contínuo de energia elétrica mesmo durante quedas na rede;
- facilidade na implementação da cogeração, a partir de tecnologias como CHP (*Combined Heating e Power*) e CCHP (*Combined Cooling Heat e Power*);
- alta frequência de saída: 1600 Hz (alta rotação, 100.000 rpm);
- manutenção simples em intervalos relativamente longos, seu sistema mecânico não é complexo, sendo composto apenas por uma coluna móvel, sem bombas ou radiadores e não necessitando de lubrificação por óleos, pois a coluna é lubrificada por um sistema de ar filtrado (*Air-Bearing*).

2.5.3 Motor ciclo Otto (grupo motor-gerador)

Motores Otto são máquinas térmicas de combustão interna alternativas, isto é, possuem válvulas que abrem ou fecham, alterando as condições ao longo do ciclo; os

exemplos mais utilizados são os motores automotivos a gasolina ou a álcool. A combustão ocorre dentro da câmara formada pelo conjunto cilindro-pistão. O pistão desloca-se dentro do cilindro, variando o volume interno da câmara desde o ponto morto inferior quando o volume interno da câmara atinge seu valor máximo, até o ponto morto superior quando o volume interno da câmara atinge seu valor mínimo. Cada cilindro é dotado de uma válvula de admissão por onde entra a mistura ar-combustível e uma válvula de exaustão (ou escape) por onde saem os gases resultantes da queima. Uma das principais características que diferenciam o motor Otto de outros é a aspiração de uma mistura ar-combustível. Para iniciar a queima dentro da câmara, produz-se uma centelha elétrica (faísca) através de uma vela, que nada mais é que um dispositivo de ignição (FARRET, 2010).

O ciclo Otto consiste detalhadamente em quatro etapas:

1 - Aspiração: abre-se a válvula de admissão aspirando a mistura ar combustível (isobárica). Ao chegar ao ponto morto inferior, fecha-se a válvula de admissão – toda a mistura combustível encontra-se dentro da câmara, a baixa pressão;

2 - Compressão: o pistão sobe até o ponto morto superior, pressurizando a mistura ar-combustível (adiabática);

3 - Expansão: a vela solta a faísca resultando na explosão da mistura. A pressão na câmara sobe bruscamente (isométrica). Impulsionado pela pressão o pistão desce até o ponto morto inferior, expandindo os gases queimados (adiabática);

4 - Exaustão: abre-se a válvula de escape, e a pressão na câmara cai bruscamente (isométrica). O pistão sobe expulsando os gases queimados. Ao chegar no ponto morto superior a válvula de escape fecha e inicia-se um novo ciclo. O movimento linear do pistão é convertido em movimento rotacional, através do dispositivo conhecido como virabrequim. O controle de rotação é obtido através da injeção de combustível. Enriquecendo-se a mistura (mais combustível), aumenta-se a rotação, e vice-versa.

O tipo de geração de energia por grupos OTTO é um mecanismo amplamente utilizado por ser um processo prático e apresentar grande durabilidade. Ainda, pode-se fazer uso da cogeração para processos industriais. No caso do Brasil, os dois principais aterros sanitários em operação que geram energia elétrica fazem uso destes sistemas. O aterro sanitário Bandeirantes possui capacidade instalada de 22 MW, fazendo uso de 20 grupos motor-gerador do tipo OTTO para a geração de energia. O aterro sanitário São João possui potência instalada de 24,6 MW, composta por 16 grupos motor-gerador do tipo OTTO (modelo G3520C) com 1,54 MW cada.

No trabalho escrito por Bancor (2003) há algumas observações entre as principais vantagens de uso dos grupos motor-gerador do tipo OTTO e sua possível aplicação em aterros, abordando interessantes particularidades de implementação. Os principais pontos favoráveis e críticos citados são:

- deslocamento e mobilidade facilitada para transporte periódico, porque os mesmos são modularizados, permitindo sua remoção. No entanto, tal facilidade não tem significado no uso em aterros sanitários, pois o tempo aproximado de geração de energia em uma planta elétrica em aterros é de 15 a 30 anos, no máximo.

- facilidade de ignição dos motores a qualquer hora que tiver que ser acionado. Este sistema é vendido largamente para energia emergencial, como por exemplo: suprimento emergencial para edifícios, hospitais, praças de esporte, entre outros. Assim como no caso anterior, esta facilidade é desprezada para o aproveitamento energético em aterros sanitários, pois o trabalho deve ser ininterrupto e de marcha constante.

- montagem acelerada, tipo “pacote”, da sua construção em blocos de “x” MW de capacidade. Embora sua faixa de potência (MW) seja um ponto economicamente favorável para o uso em aterros sanitários, o tempo de instalação de equipamentos não é muito significativo na implantação de uma planta termelétrica, quando se situa dentro de 6 a 15 meses, pois normalmente há toda uma preparação paralela de implantação da coleta dos gases e sua instrumentação, o que exige bastante cuidado e tempo¹.

2.5.4 Motor Stirling

Os motores Stirling possuem basicamente dois lados ou partes (WALKER, 1980). Esta divisão ocorre devido ao estado do gás ou fluido de trabalho durante o ciclo termodinâmico, na sua expansão e compressão, absorvendo e liberando calor. O ciclo Stirling, no seu lado quente aproveita a energia térmica (calor) de outra fonte que pode ser proveniente da queima de algum combustível ou de certas quantidades de calor rejeitadas em outros ciclos. A partir desse calor, o ciclo Stirling é capaz de produzir trabalho, que pode ser aproveitado para a geração de energia. A parte fria do motor Stirling é o congelador. Dentre as vantagens do uso do motor Stirling (HOFFMANN, 2002), têm-se:

- capacidade de utilização de vários combustíveis;

¹ caso o sistema de captação e a estação de biogás não estejam construídos.

- funcionamento silencioso: nos motores Stirling não há válvulas, nem muitos elementos móveis ou explosões periódicas, o que causa um baixíssimo nível de ruído e vibração;

- baixo desgaste interno e consumo de lubrificante: os produtos da combustão não entram em contato direto com as partes móveis do motor (combustão externa). Desta forma, não há contaminação do lubrificante;

- possibilidade de cogeração.

Em se tratando das desvantagens (HOFFMANM, 2002), têm-se:

- custo: o motor Stirling ainda é aproximadamente duas vezes mais caro se comparado a um motor Diesel de mesma potência. O que encarece a fabricação é a produção dos trocadores de calor ideais;

- perfeita vedação: os motores Stirling necessitam de boa vedação das câmaras que contém o gás de trabalho para evitar a contaminação do gás de trabalho pelo lubrificante.

Aplicações de motores Stirling no Brasil estão descritas em Corria (2005) e, em se tratando especificamente do aproveitamento energético do biogás em aterros sanitários há exemplos apresentados por Mckenna (2003), assim como comparações operacionais entre esta e outras tecnologias alimentadas por biogás.

2.5.5 Ciclo Rankine (turbina a vapor)

O Ciclo Rankine possui características técnicas de termo-dinâmica baseadas na geração de vapor e na condensação, na produção de energia mecânica e/ou térmica em circuito fechado de vapor. Este processo é largamente empregado no Brasil, principalmente nas usinas de açúcar e de álcool.

Nestas instalações o combustível é queimado em uma caldeira, e seus gases quentes geram vapor de alta pressão. O calor liberado na fornalha por combustão de combustíveis gasosos é transmitido à água circulando a alta pressão na caldeira produzindo vapor. Este vapor é conduzido à turbina (a vapor) onde se expande, fazendo-a rodar. Da turbina, o vapor passa ao condensador onde circula água de arrefecimento, também designada por água de refrigeração. A água condensada volta, sob pressão, por efeito de um sistema de bombas à caldeira.

A eficiência notada nesta tecnologia e largamente aplicada ao mercado baseia-se na forma mais econômica de geração de energia, com custos mais acessíveis a cada projeto (BANCOR, 2003). Os principais sistemas que compõe este ciclo são:

- caldeiras geradoras de vapor;
- turbinas a vapor de simples ou múltiplos estágios;
- condensadores de linha e de resfriamento principal;
- geradores de eletricidade.

Devido às características operacionais, a instalação de um sistema baseado no ciclo Rankine está projetada para funcionamento contínuo, sem paradas para manutenções preventivas, como acontece no Ciclo OTTO, tendo sua vida útil calculada como triplo de outros processos. Sua produção é nacional, com os fabricantes localizados próximos ao centro de demanda de serviços e de reposição, assim como permitem operacionalidade nos estudos de expansões e outros. Ainda, pode-se fazer uso da cogeração para processos industriais.

Com relação ao uso de turbinas a vapor para a geração de energia a partir do biogás de aterros sanitários, existem casos onde a potencia instalada chega a 50 MW, proporcionando uma geração considerável de energia elétrica (SPOKAS et al, 2006). Deve-se ter conhecimento que a aplicação desta tecnologia em sistemas de pequeno porte é considerada inviável, ponderando não somente o critério custo, mas o processo construtivo e a quantidade de potencia do sistema – não inferior a valores próximos a 3 MW.

2.5.6 Células a combustível

Uma célula a combustível é uma célula eletroquímica, podendo ser considerada como uma bateria em que os reagentes são alimentados continuamente. Os reagentes típicos são o hidrogênio e o oxigênio. O hidrogênio é fornecido do lado do ânodo e o oxigênio no lado do cátodo. As baterias comuns têm que ser recarregadas de tempos em tempos porque os reagentes esgotam-se. As células a combustível estacionárias não portáteis, pelo contrário, não necessitam ser recarregadas, uma vez que seus reagentes são fornecidos de forma contínua.

O combustível mais utilizado pelas células a combustível é o hidrogênio (H_2). As principais formas de produção de hidrogênio podem ser observadas na Figura 2.2 (COBAS, 2006).

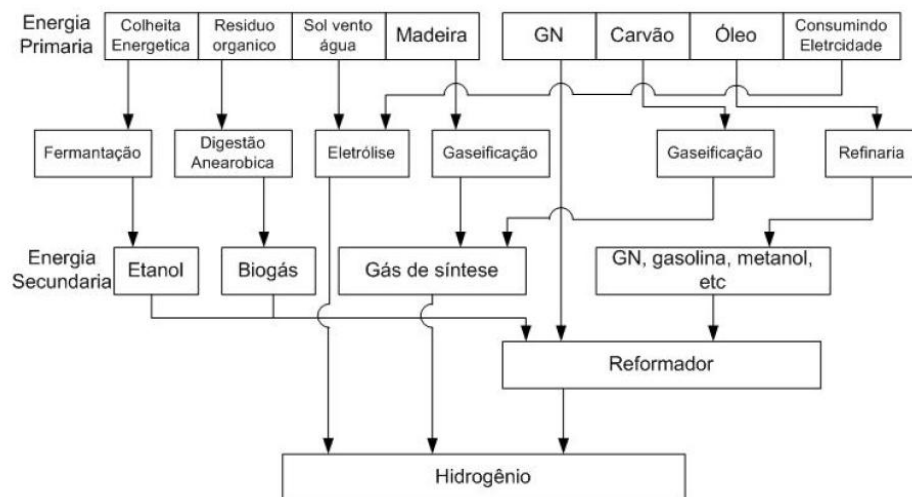


Figura 2.2 Principais formas de produção de hidrogênio (Fonte: COBAS, 2006).

A produção do H_2 é normalmente realizada através da eletrólise da água, embora possa haver uma geração através do metano, componente principal do gás natural e biogás, obtendo até 80% de rendimento. Todavia, o método de conversão do metano liberta gases para o meio ambiente, sendo um processo menos ecologicamente correto em comparação ao uso da água.

A eletrólise é um processo que separa os elementos químicos de um composto através do uso da eletricidade. De maneira sumária, procede-se primeiro à decomposição (ionização ou dissociação) do composto em íons. A partir disso, há a passagem de uma corrente contínua através destes íons, resultando na obtenção dos elementos químicos. Em muitos casos, dependendo da substância a ser eletrolisada e do meio em que ela ocorre, além da formação destes elementos ocorre também a formação de novos compostos. O processo da eletrólise é uma reação de oxirredução oposta àquela que ocorre numa célula eletrolítica, sendo, portanto, um fenômeno físico-químico não espontâneo.

A escolha pela análise dos tipos de células a combustível descritas neste trabalho de doutorado se justifica não apenas pela aplicação das mesmas verificadas na literatura (FARRET e SIMÕES, 2006), mas também devido ao fato destas tecnologias serem compatíveis com a qualidade do combustível a ser utilizado, assim como possuírem uma alta temperatura de operação, o que também possibilita o aproveitamento da energia térmica através da cogeração. Estas argumentações tomam como base a flexibilidade no uso e no tratamento do combustível considerando a maior tolerância às impurezas deste combustível (não precisam de H_2 puro) nos tipos de célula em questão (BOVE e LUNGUI, 2006). Além

disso, células a combustível que operam em baixas temperaturas possuem maiores emissões de gases nocivos ao meio ambiente quando alimentadas por biogás (TROGISCH et al, 2005).

A partir destas considerações, este trabalho aborda as seguintes células para a geração de energia elétrica com o uso do biogás proveniente do tratamento de RSU:

- PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cells);
- MCFC (Molten Carbonate Fuel Cells);
- SOFC (Solid Oxide Fuel Cells).

2.5.6.1 PAFC - *Phosphoric Acid Fuel Cells*

Este tipo de célula a combustível utiliza ácido fosfórico líquido como eletrólito e eletrodos de carbono poroso com um catalisador de platina possuindo uma tolerância ao monóxido de carbono (FARRET e SIMÕES, 2006).

As células a combustível PAFC são consideradas a primeira geração de alto desenvolvimento tecnológico para serem usadas comercialmente em veículos de transporte (ônibus) e principalmente em geradores de energia (estacionários). Assim como todas as células que utilizam um catalisador de platina, as células PAFC têm um custo bem elevado. Ainda, por possuírem dimensões e peso proporcionais a células a combustível de porte elevado sua aplicação só é justificada em sistemas estacionários. Sua temperatura de operação fica em torno de 200°C, utilizando como alimentação principalmente o gás natural ou biogás (metano) e ar, trazendo como consequência as vantagens deste tipo de combustível.

A potência máxima de operação para unidades estacionárias se limita a poucas centenas de kW. Com relação à aplicação da célula PAFC para a geração de energia elétrica a partir do biogás de aterros sanitários, encontra-se na literatura um estudo sobre sua possível utilização (SPIEGEL et al, 1997) e sua implementação com sucesso no EUA (SPIEGEL et al, 1999).

2.5.6.2 MCFC - *Molten Carbonate Fuel Cells*

MCFCs são células a combustível de altas temperaturas (em torno de 650°C) que utilizam um eletrólito composto de bicarbonato fundido e metais não preciosos no anodo e catodo, reduzindo desta forma seu custo final.

Ao contrário da célula a combustível PAFC, as células MCFC não necessitam de um reformador externo para conversão do combustível em hidrogênio. Devido às altas temperaturas de operação, este processo é feito internamente (*internal reforming*), reduzindo ainda mais o custo final do sistema. Além do custo reduzido e do alto rendimento, outra grande vantagem desta célula é a resistência da mesma ao CO ou CO₂, podendo até usar o próprio CO como combustível. Atualmente, está sendo desenvolvido um grupo de células MCFCs que aproveitam fontes “suja” de energia como alimentação, baseando-se sempre no seu resistente reformador interno para produção de H₂.

A principal desvantagem desta célula é a baixa durabilidade. As altas temperaturas de operação e o tipo de eletrólito utilizado (corrosivo) diminuem a vida útil do sistema. A potência de operação para unidades estacionárias vai de poucas centenas de kW podendo chegar a valores próximos de 1 MW (FARRET e SIMÕES, 2006). Em se tratando da aplicação da célula MCFC para a geração de energia elétrica a partir do biogás de aterros sanitários, pode-se encontrar na literatura sua descrição detalhada (BOVE e LUNGUI, 2006) e aplicação com sucesso (TROGISCH et al, 2005).

2.5.6.3 SOFC - *Solid Oxide Fuel Cells*

Este tipo de célula a combustível utiliza uma cerâmica dura não porosa como eletrólito, proporcionando assim uma montagem diferente em relação às outras células a combustível.

Como a sua temperatura de operação é muito elevada, chegando a 1000°C, não há necessidade do uso de metais no catalisador, além de possibilitar que a conversão do combustível em hidrogênio seja feita internamente, reduzindo consideravelmente o custo do sistema. Outra vantagem, também característica das células que operam em altas temperaturas, é a sua resistência ao enxofre e monóxido de carbono (CO), podendo até usar o próprio CO ou outros gases como combustível para o sistema.

Uma das principais desvantagens proveniente desta alta temperatura é a necessidade da utilização de um revestimento para retenção do calor e para proteção pessoal, aceitável para grandes unidades estacionárias, mas inviável em veículos e pequenas unidades, proporcionando uma considerável elevação no custo final. Atualmente está sendo pesquisado o potencial de SOFCs com temperaturas reduzidas, inferiores a 800°C, com intuito de se obter

além de uma redução nos custos do revestimento e dos materiais, um acréscimo a vida útil do sistema.

A potência máxima de operação para unidades estacionárias é inferior, em comparação com as demais células a combustível em análise, em torno de 100 kW. (FARRET e SIMÕES, 2006). Em se tratando da aplicação da célula SOFC para a geração de energia elétrica a partir do biogás de aterro sanitário, pode-se encontrar na literatura sua descrição detalhada (BOVE e LUNGUI, 2006) e aplicações com sucesso em (VAN HERLE et al, 2003), (SEITARIDES, 2008).

2.6 Considerações finais do capítulo 2

Como visto neste Capítulo, a geração de resíduos sólidos urbanos é um dos problemas mais relevantes da sociedade moderna, agravado pelo crescimento gradativo e desordenado da população, pela aceleração do processo de ocupação do território urbano e pelo desenvolvimento dos bens de consumo popularizados com o aumento da produção industrial. Atualmente existe uma carência de uma política adequada para a viabilização do uso das tecnologias de aproveitamento energético de RSU no mercado brasileiro. Deve-se enfatizar que a geração de energia elétrica a partir do biogás de RSU necessita de caráter prioritário no país, não apenas pela diversificação da matriz energética com o uso de fontes renováveis, mas também por questões sociais e ambientais – características essenciais que definem a sustentabilidade.

Os sistemas de maior porte geração de energia elétrica com o biogás de RSU existentes no Brasil são bons exemplos para demonstrar o potencial de produção de energia que pode ser desenvolvido a partir do gerenciamento de aterros sanitários visando à geração elétrica com o uso do biogás, atendendo centenas de consumidores e proporcionando inúmeros benefícios econômicos e operacionais aos sistemas de distribuição de energia. De fato, mesmo sistemas de geração de menor porte possuem ampla capacidade de gerar tais benefícios, além de possibilitar a auto suficiência energética do aterro e, se houver a conexão a rede de distribuição para venda de excedente de energia elétrica, promover o melhoramentos dos níveis de tensão dos consumidores atendidos, diminuição de perdas de energia, assim como prever a possibilidade de prestação de serviços ancilares.

3 MÉTODOS MULTICRITERIAIS: APOIO A DECISÃO

O Capítulo 3 descreve as principais metodologias multicriteriais que podem ser aplicadas ao estudo em questão – introdução, histórico – assim como a possível utilização das mesmas para a seleção de fontes de geração e armazenamento de energia elétrica (estado da arte). Posteriormente, são apresentadas análises detalhadas dos dois métodos selecionados como base para aplicação aos estudos de caso iniciais.

3.1 Introdução a métodos multicriteriais

Nas últimas duas décadas tem sido constatado o início de uma significativa mudança no pensamento dos principais interessados em processos decisórios, considerando problemas de planejamento e gerenciamento de energia elétrica. Projetos regidos por análises monocriteriais vinculadas apenas ao critério custos começaram a dar lugar a análises multicriteriais, considerando também problemas de natureza social e ambiental.

No entanto, ainda nos dias atuais o que acontece na grande maioria dos casos, principalmente em âmbito nacional, é a priorização na escolha por uma determinada tecnologia julgada apenas por uma única ótica – custos. Assim é interessante substituir avaliações monocriteriais por análises multicriteriais que permitam a avaliação e a satisfação de diversos critérios. Nestes casos, embora a melhor solução não seja atingida para um critério específico, ao final obtém-se uma solução mais satisfatória que tende a incorporar de forma clara as preferências dos ADs, em prol de uma análise global do processo decisório.

3.2 Histórico dos métodos de apoio à decisão

Nos anos 60 foram iniciadas pesquisas com o objetivo de buscar soluções ótimas de apoio a decisão, motivo este que se tornou a principal causa do desenvolvimento de novos métodos decisórios (ROY, 1968).

A lógica fuzzy ou lógica difusa foi primeiramente proposta por Zadeh (1965). O uso da lógica difusa em análises multicriteriais permite simular a forma humana de raciocínio a

partir da coleta de dados reais e da implementação do conhecimento do operador (especialista) aplicada a formulação linguística do sistema fuzzy (MENDEL, 1995). Um modo de aplicação da lógica difusa é a construção de sistemas fuzzy (ZIMMERMANN, 1999) que são sistemas especialistas que basicamente seguem as seguintes etapas: entrada de critérios quantitativos e qualitativos, método de fuzzificação e modelagem com regras e conjuntos fuzzy, inferência fuzzy (avaliação das regras e agregação), método de defuzzificação e classificação final (saída numérica devidamente classificada de forma linguística).

Ainda no início da década de 70 foram elaborados métodos de tomada de decisão como o *Elimination and Choice Translating Reality* (ELECTRE) e o *Analytic Hierarchy Process* (AHP) propondo o encontro de soluções baseadas em processos decisórios reais. Com o surgimento de tais métodos, os processos decisórios complexos passaram a ser analisados sob dimensões de abrangência até então não disponíveis, embora se tenha admitido algumas limitações no uso destes métodos (SALLES-FILHO et al, 2001).

Durante o passar dos anos duas escolas se destacaram: na escola americana primeiramente o desenvolvimento de funções multiatributo e, posteriormente, o desenvolvimento do método AHP; e na escola francesa a aplicação dos métodos da família ELECTRE (*Élimination et Choix Traduisant la Réalité*).

Na escola americana Keeney e Raiffa (1976) propuseram a construção de uma função matemática, agregando as informações dos múltiplos atributos (critérios) e associando uma medida de valor a cada alternativa em análise. Posteriormente, o AHP, desenvolvido por Saaty, foi considerado um dos métodos de maior destaque já elaborados. No AHP há possibilidade de checagem da qualidade dos dados de entrada (GOMES, ARAYA e CARIGANO, 2004), (SALOMON e SHIMIZU, 2006). Para isso, Saaty propõe o cálculo da inconsistência dos julgamentos, denominada Razão de Consistência (C.R. – *Consistency Ratio*). Esta inconsistência entre os julgamentos deve servir como um alerta, sendo a revisão dos julgamentos um procedimento sistemático para a melhoria do processo de tomada de decisão. Na década de noventa, com a constatação das limitações do método AHP, Bana e Vansnick (1994) desenvolveram o método MACBETH, com base no método AHP, mas com aperfeiçoamentos que possibilitam o uso das matrizes de comparação paritárias mantendo um grau de consistência adequado e, dessa forma, corroborando os resultados finais obtidos.

Na escola francesa destacam-se os métodos da família ELECTRE. Estes métodos apenas fornecem a ordenação das alternativas com base em princípios de dominância. Outros

métodos deste tipo fornecem, além desta ordenação, uma medida do desempenho das alternativas, considerando todos os critérios (desempenho global).

3.3 Estado da Arte – utilização de métodos multicriteriais no gerenciamento e seleção de sistemas de geração e armazenamento de energia

Mesmo com a predominância de análises monocriteriais na área de planejamento de energia elétrica, é possível encontrar diversos estudos multicriteriais com este intuito desde a década de setenta (BLAIR, 1979), (GOLABI et al, 1981), (KAVRAKOGLU, 1983), (AMAGAI e LEUNG, 1989) até os anos mais recentes (MOHSEN e AKASH, 1997), (GANDIBLEUX, 1999), (AFGAN e CARVALHO, 2002), (HARALAMBOPOULOS e POLATIDIS, 2003), (MALIK E SUMAOY, 2003), (KABLAN, 2004), (RAMIREZ-ROSADO e DOMINGUEZ-NAVARRO, 2004 e 2006), (MUELA et al, 2007), (LOKEN, 2007), (SALAH et al, 2008), (WANG et al, 2008), (SCHWEICKARDT e MIRANDA, 2009).

Em Wang et al (2009) é realizada uma minuciosa revisão bibliográfica apresentando diversos autores que fizeram uso de diferentes critérios visando o planejamento de sistemas elétricos de energia, considerando aspectos de natureza econômica, operacional, ambiental e social.

Em Keeney (1998), dentre os diversos estudos realizados por este autor, destaca-se, mais precisamente na área energética, a utilização de funções multiatributos para tomadas de decisão referente a uma hidrelétrica localizada na Inglaterra – estudo realizado no ano de 1989. Esta tomada de decisão agrega critérios de natureza quantitativa e qualitativa incluindo aspectos econômicos, ambientais, segurança, qualidade de serviço (geração de energia elétrica e atendimento aos consumidores) e reconhecimento público, além de envolver diferentes grupos da sociedade – consumidores, grupos ambientais, organizações governamentais, entre outros. O objetivo deste estudo foi desenvolver um ranking de ações (alternativas) que deveriam ser tomadas – priorizadas – de acordo com os interesses globais envolvidos. Uma grande contribuição deste trabalho é o detalhamento de como foi discutido e selecionado a aplicação de cada um dos critérios envolvidos e cada um dos objetivos (alternativas) a serem atingidos. Ainda, após a obtenção de um resultado final para o estudo de caso avaliado por Keeney, é possível relatar as seguintes contribuições da aplicação do método:

- avaliação minuciosa de diversas alternativas;

- melhoramento da comunicação entre os interessados, o que facilita o envolvimento de múltiplos *stakeholders*;
- criação de uma forma de orientação para pensamentos estratégicos relacionados ao estudo proposto;
- identificação de oportunidades de decisão, o que propicia uma forma de controle – sobre os processos decisórios.

Por outro lado o método de função multiatributos desenvolvido por Keeney e aplicado em diversos estudos de caso, abrangendo diferentes áreas de aplicação (TSETLIN e WINKLER, 2007), (KÖKSALAN, e PLANTE, 2003 apud WALLENIOUS et al, 2008), tem as seguintes características desfavoráveis:

- grau de complexidade elevado quando são avaliados diversos critérios;
- necessidade de comparações a par (*trade-off*), onde a escolha ou preferência por um critério implica necessariamente na abdicação de outro critério.

Em Afgan e Carvalho (2002) é apresentada uma metodologia multicriterial para avaliação e seleção de fontes de energia (térmica e elétrica) a partir de indicadores de sustentabilidade gerados com valores não numéricos. No estudo apresentado por estes autores, os indicadores relacionam as necessidades sociais, ambientais e econômicas de cada caso para a seleção de determinada fonte. Embora a metodologia de Afgan e Carvalho (2002) tenha se demonstrado inovadora, a seleção de sistemas fazendo uso de relações não numéricas torna a metodologia muito geral e subjetiva. De fato é essencial a consideração de critérios sociais e ambientais para a seleção de uma fonte em uma realidade local específica. Todavia, é também essencial a análise de critérios reais com dados mais próximos possíveis a realidade local de aplicação do projeto, como custos, eficiência, vida útil, entre outros. Deve-se considerar ainda que o principal objetivo de Afgan e Carvalho (2002) foi apresentar uma ferramenta para ser utilizada na determinação de uma lista prévia, a partir da análise de fontes de geração completamente diferentes, resultando na lista das possíveis fontes a serem instaladas com foco na sustentabilidade do meio em questão.

Em Beccali et al (2003) é apresentada a utilização do método ELECTRE para a determinação de ações para a aplicação de fontes de geração em três diferentes perspectivas. No trabalho deste autor são avaliadas diversas formas de geração elétrica e térmica com a definição de variados critérios. Este é um dos principais aspectos positivos do trabalho, ilustrando a diversidade de critérios que podem ser analisados na seleção de sistemas de geração de energia. Como resultado final, seguindo as características do método ELECTRE, são apresentadas as possíveis ações que poderiam ser tomadas e as que não devem ser

tomadas, e não exatamente um ranking final. Esta diversidade de critérios que podem ser analisados para a seleção de fontes de geração de energia também é abordada de forma minuciosa por Chatzimouratidis et al (2009).

Em Haralambopoulos e Polatidis (2002) foi apresentado o uso do método PROMETHEE para a seleção de fontes primárias de energia (solar, vento, biomassa e geotérmica) a partir da análise de critérios quantitativos e qualitativos considerando aspectos econômicos, sociais e ambientais. Como o objetivo destes autores era a seleção de fontes primárias, e não de sistemas de geração, não há a avaliação de quaisquer critérios operacionais, como a eficiência e a vida útil. No entanto, com relação à disponibilidade da fonte primária e a previsão de uso de uma determinada tecnologia para o aproveitamento do potencial energético desta fonte, seria essencial a análise destes dois critérios para a classificação destas fontes. É interessante destacar a idéia apresentada por Haralambopoulos e Polatidis (2002) para a análise das perspectivas propostas, relacionando o estudo de caso em questão com possíveis alterações, representadas por mudanças fracas, intermediárias, avançadas e intensivas.

Os estudos realizados por Beccali et al (2003) com o uso do método ELECTRE e por Haralambopoulos e Polatidis (2002) com o uso do método PROMETHEE, apresentam a viabilidade da utilização destes dois métodos para a seleção de fontes de energia. No entanto, por não apresentarem um ranking final com a melhor opção (classificação ordenada de forma direta), estes métodos diferem do objetivo principal da metodologia proposta nesta tese de doutorado. Métodos dos tipos ELECTRE e PROMETHEE não são utilizados para apresentar uma classificação definitiva das opções em questão, mas estes métodos podem ser muito úteis para categorizar quais seriam as opções que devem ser incluídas na análise em um determinado estudo de caso, assim como opções que podem ser completamente descartadas (BELTON e STEWART, 2002).

Em Kahraman et al (2009) é utilizada uma mistura de conceitos matemáticos encontrados no desenvolvimento do método AHP e da lógica fuzzy para o desenvolvimento de uma metodologia para a classificação de quais seriam os melhores sistemas de geração renovável de energia a sofrerem futuros investimentos em um determinado estudo de caso. No estudo deste autor, são analisadas fontes renováveis de geração de um modo geral, assim como são considerados diversos critérios de natureza econômica, ambiental, social e operacional. Como resultado final, são apresentados gráficos com as variações de cada alternativa para cada critério em questão e também como um todo, envolvendo os diversos critérios em análise. A metodologia desenvolvida por Kahraman et al (2009) se demonstra

muito interessante. No entanto, o excesso de formulações matemáticas e relações estabelecidas entre os critérios e os denominados sub-critérios torna a metodologia complexa e, conseqüentemente, de difícil compreensão.

Em Wang et al (2008) novamente fez-se uso dos princípios matemáticos da lógica fuzzy e do método AHP para selecionar o melhor sistema de geração de energia elétrica com geração de energia térmica para aquecimento e resfriamento (*trigeneration system*) a ser instalado em um prédio residencial. Embora o desenvolvimento matemático apresentado por este autor esteja mais claro que o de Kahraman et al (2009), em ambos artigos não foram referenciados os problemas descritos por Bana e Vansnick (2008) encontrados na análise matemática do método AHP. Estas verificações são essenciais para a validação dos resultados finais, conforme apresentado em detalhes no Apêndice C. Sem a verificação das análises matemáticas propostas por Bana e Vansnick (2008), não há como garantir que a metodologia Fuzzy – AHP apresentada por Kahraman et al (2009) e Wang et al (2008) possua credibilidade suficiente para serem utilizadas no estudo desenvolvido nesta tese.

Nos artigos de Akash et al (1999) e Petros et al (2009) foi apresentado o uso do método AHP para a seleção de fontes renováveis de energia, comparando-os ainda com fontes alimentadas por combustíveis fósseis. Embora estes dois artigos se baseiem nos princípios matemáticos de Saaty (1980), não foram apresentadas as etapas de construção das tabelas de comparação par a par, assim como os resultados para os cálculos da razão de consistência, etapa que, segundo Saaty, é necessária para a corroboração dos resultados finais.

Em Chatzimouratidis et al, (2009) fez-se uso do método AHP para a classificação de várias fontes primárias de energia, renováveis e não renováveis, considerando uma ampla diversidade de critérios. Ainda, foi realizada uma análise sensitiva das perspectivas em questão, considerando possíveis modificações nos fatores tecnológicos e de sustentabilidade (agrupados), assim como em fatores econômicos. Esta é a grande contribuição do trabalho destes autores, apresentando uma interessante análise sensitiva de como estas fontes irão se comportar no futuro de acordo com cada critério analisado. Esta análise foi essencial para a obtenção do objetivo proposto por Chatzimouratidis et al (2009) de selecionar qual seria a melhor fonte primária a ser utilizada nos próximos anos.

Tanto nos artigos apresentados por Akash et al (1999) e Petros et al (2009) como no de Chatzimouratidis et al (2009), não houve quaisquer citações referentes as limitações do método AHP e aos estudos descritos por Bana e Vansnick (2008).

Em Montignac (2009) há a avaliação de três diferentes tipos de armazenamento de hidrogênio, avaliando cinco diferentes critérios, onde fez-se uso do software M-MACBETH.

Os ADs foram consultados para a determinação dos pesos (grau de atratividade entre os critérios), de forma semelhante aos pesos estabelecidos no método AHP. É interessante observar a definição de níveis (satisfatório e aceitável) estabelecida para este método, em uma escala de 0 a 100, representando os valores normalizados dos critérios envolvidos. Na utilização do método MACBETH pode ser obtida uma comparação entre as performances das alternativas envolvidas considerando tanto parâmetros quantitativos (características de cada tecnologia) e qualitativos (níveis de referência e julgamentos). Por outro lado, a necessidade de atribuição dos tais pesos para todos os critérios em análise, inclusive aos parâmetros quantitativos que possuem valores reais concretos, pode atribuir um alto grau de subjetividade aos resultados finais. Ponderando principalmente este aspecto (considerando também a não disponibilidade de licença para uso deste software), o software M-MACBETH não foi utilizado no estudo proposto nesta tese.

Com relação à aplicação da lógica fuzzy – ajuda a decisão com lógica difusa – baseada especificamente na viabilidade da modelagem matemática de variáveis subjetivas ou incertas por meio do uso de regras e conjuntos fuzzy, para a seleção de sistemas de geração e armazenamento de energia elétrica, foi constatada inexistência de estudos atuais com este objetivo. Provavelmente, isto seja justificado pelo fato de que para a devida aplicação de uma análise multicriterial à análise destes sistemas, diversos critérios devem ser considerados. No caso do uso da lógica difusa, se aplicada da forma tradicional, a necessidade de avaliação de diversos critérios ocasiona um esforço computacional excedente e dificulta o desenvolvimento das regras – criação de milhares de regras – comprometendo a corroboração da aplicação da lógica assim como a devida participação dos principais interessados no processo decisório.

A partir das verificações obtidas no estado da arte das principais metodologias multicriteriais utilizadas para o gerenciamento e seleção de sistemas de geração de energia, fez-se a escolha inicial pela análise comparativa – estudos preliminares Apêndice B – a ser desenvolvida com a lógica difusa e com o método AHP. Ainda, deve ser considerada para esta escolha a grande diferenciação na construção e base teórica destes dois métodos, o que possibilita a comparação inicial de resultados provenientes de métodos bem distintos. A lógica difusa, tomando como base a modelagem matemática de variáveis subjetivas ou incertas por meio da definição de regras e conjuntos, se difere de quaisquer métodos citados nesta tese, de forma aplicativa, construtiva, avaliativa e interativa, tornando-a a metodologia de maior relevância a ser descrita e utilizada.

3.4 Lógica fuzzy (sistemas difusos ou nebulosos)

A lógica difusa é uma abordagem que transcende as restrições impostas pela lógica binária tradicional, sendo considerada uma poderosa ferramenta matemática com base em teorias matemáticas fundamentadas, que pode ser utilizada para – construção de modelagens – em diversas áreas de atuação (BELOHLAVEK et al, 2009). Basicamente, a modelagem difusa é uma modalidade capaz de tratar conceitos vagos, imprecisos ou ambíguos – em geral descritas na linguagem natural humana – e convertê-los para um formato numérico, de processamento computacional simplificado (SHAW e SIMÕES, 1999).

Segundo Ruspini (RUSPINI, 1998), “*os novos conceitos fundamentados por Zadeh propuseram uma nova metodologia para o tratamento de problemas que até então não eram abordados corretamente pelas teorias existentes*”. A primeira aplicação prática para solução de problemas de controle foi relatada por (MAMDANI e ASSILIAN, 1975), mais tarde começaram a surgir outras aplicações industriais (RUSPINI e MAMDANI, 1998).

Na lógica difusa existe a possibilidade de um elemento pertencer a mais de um conjunto, e em graus diversos, diferentemente dos conjuntos tradicionais. A pertinência de um elemento numa variável fuzzy não é uma questão de afirmação ou negação, mas uma questão de grau (KLIR e YUAN, 2003). Este grau representa um nível de compatibilidade do elemento sobre o conjunto, na qual o valor zero significa não participação, o valor um significa participação plena e demais valores entre zero e um significam participação parcial.

Um modo de aplicação da lógica difusa é a construção de sistemas fuzzy (ZIMMERMANN, 1999) que são sistemas compostos da análise (entrada) de critérios quantitativos e qualitativos, método de fuzzificação e modelagem, regras fuzzy, inferência fuzzy (avaliação das regras e agregação), método de defuzzificação e classificação final (saída numérica devidamente classificada de forma linguística). Na Figura 3.2 há uma ilustração de como estes componentes podem ser claramente observados.

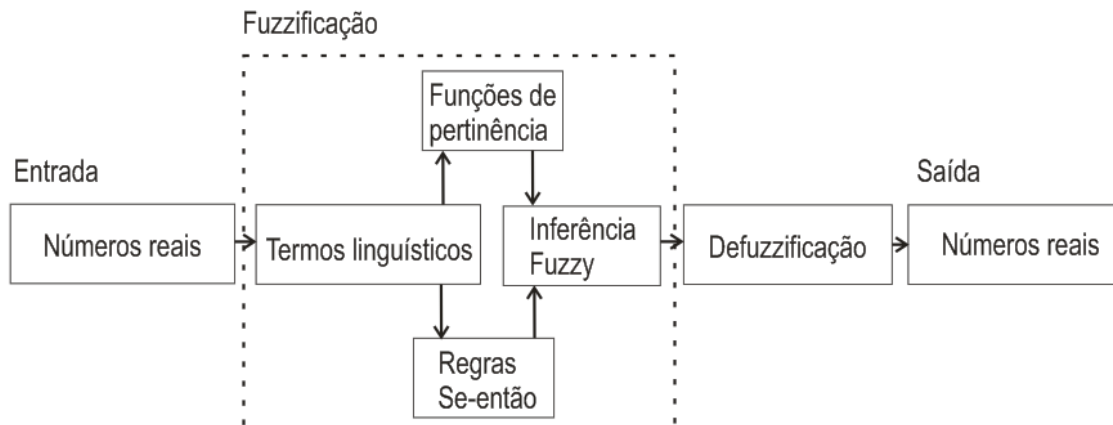


Figura 3.2 Componentes Fuzzy - Sistema Mamdani (Fonte: adaptado de Barros, 2006).

3.4.1 Fuzzificação (controladores fuzzy) e funções de pertinência

Para processar as entradas do sistema, realiza-se primeiramente a fuzzificação, que consiste no emprego das funções de pertinência que traduz cada um dos critérios em análise para valores fuzzificados. Em outras palavras, nessa fase, são acionados os conjuntos fuzzy (armazenados na base de regras fuzzy) responsáveis pela modelagem das variáveis de entrada, convertendo-as do formato crisp para o fuzzy. Desta forma, todas as variáveis de entrada podem ser traduzidas em termos linguísticos (por exemplo, alto, médio e baixo).

Os tipos de sistemas de fuzzificação, também denominados de controladores fuzzy, mais conhecidos são Mandani e Takagi-Sugeno. A principal diferença entre estes dois sistemas é a forma da saída de dados – geração dos resultados finais. Enquanto em Mandani podem ser utilizadas diferentes técnicas de defuzzificação, possibilitando ainda uma saída fuzzy ou crisp, em Sugeno é aplicado o método denominado *weighted average* gerando um resultado crisp a partir de uma função de valores. Segundo Yusoff et al (2007) o poder de interpretabilidade é perdido em Sugeno, pois os consequentes das regras não são fuzzy, ou seja, a saída não é composta por graus de pertinência fuzzy, como pode ser observado na Figura 3.3.

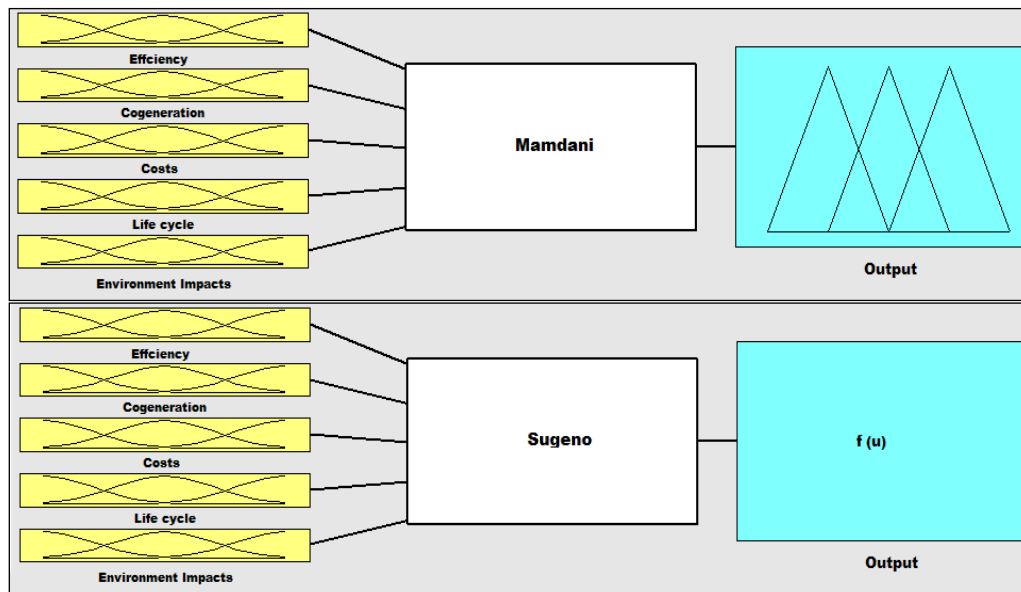


Figura 3.3 Controladores Fuzzy - Mamdani (acima) e Takagi-Sugeno (abaixo). Fonte: Software MATLAB®.

O controlador fuzzy escolhido para ser utilizado no desenvolvimento da metodologia de ajuda a decisão proposta nesta tese é do tipo Mamdani. Este sistema foi inicialmente concebido por Zadeh e outros pesquisadores, entre os quais E.H. Mamdani, que deu início a aplicações de caráter prático na década de 70. Em virtude disso, este tipo de sistema fuzzy é usualmente denominado Mamdani. O sistema fuzzy Mamdani é sempre composto por fuzzificadores, métodos de inferência e defuzzificadores. Segundo Ross (2004) e Driankov et al (1996) o sistema Mamdani é o mais conhecido e utilizado na prática e na literatura. Dentre suas principais características, que justificam sua aplicação em problemas de engenharia, pode-se citar (LIANG e WANG, 1991), (HAMAM e GEORGANAS, 2008):

- utilizado em análises de engenharia, pois seus dados de entrada e saída são compostos por valores reais;
- incorpora as regras fuzzy com praticidade seguindo o raciocínio humano de análise;
- alto nível de interpretação e entendimento;
- possui diversos tipos de fuzzificadores, métodos de inferência e defuzzificadores, o que atribui um maior grau de liberdade ao programador, assim como diversifica os tipos (natureza) de problemas que podem ser analisados;
- possibilita uma integração linguística e numérica de forma consistente;
- resultados finais (output) podem ser no formato fuzzy ou crisp.

3.4.2 Inferência fuzzy

Para a aplicação das regras no processo de inferência fuzzy é fundamental estabelecer uma variável fuzzy, definir a etapa de relevância prévia dos critérios e as meta-regras, e escolher o método de inferência a ser aplicado. Desta forma, podemos dividir o processo de inferência, nos seguintes passos:

- seleção da função de pertinência e variável fuzzy: os graus de pertinência fuzzy são obtidos através das funções de pertinência representadas por formas geométricas diversas. As principais formas são: triangular, trapezoidal e gaussiana (COX, 1999). O número prático de funções de pertinência é algo entre 2 e 7 para cada variável fuzzy (que representa cada um dos critérios em questão). Quanto maior o número de funções maior o cruzamento de regras e, conseqüentemente, maior a precisão nos resultados. No entanto, experiências mostraram que uma mudança de 5 funções triangulares para 7 aumenta a precisão em menos de 15% e a partir de valores maiores não há melhorias significativas (SHAW e SIMÕES, 1999). A variável utilizada para a modelagem difusa proposta nesta tese é uma variável padronizada com um formato triangular e cinco funções de pertinência (muito baixo - VL, baixo - L, médio - M, alto - H e muito alto - VH). As principais justificativas da utilização de funções triangulares podem ser encontradas em Pedrycz (1994).

- definição da etapa de relevância prévia, criação de meta-regras e construção das regras: a construção das regras constitui aspecto fundamental no desempenho de um processo de inferência e deve ser realizada com auxílio do especialista e, se possível, com a participação dos demais envolvidos em cada estudo de caso. Extrair estas regras na forma de sentenças do tipo SE – ENTÃO pode ser um processo adverso, com redundâncias, inconsciências, assimetrias e regras desnecessárias. Para auxiliar o desenvolvimento das regras no processo de inferência fuzzy, deve-se criar uma relevância prévia dos critérios avaliados (BARIN et al, 2009), além de construir meta-regras para orientar a construção de tais regras (CHEN, 1996) (RAUMA, 1997). É importante salientar que o principal objetivo das meta-regras é orientar a construção das regras em cada modelagem difusa, relacionando estas regras diretamente com as etapas de relevância prévia desenvolvidas (diferentes perspectivas). Considerando ainda estudos de caso que envolvam a análise de diversos critérios, o formato de apresentação das regras é outra etapa fundamental para corroborar a modelagem desenvolvida para cada processo decisório. A descrição das meta-regras e das etapas de relevância, assim como a apresentação destas regras no formato “escada” podem ser visualizadas no Capítulo 4.

- seleção do método de inferência a ser aplicado no controlador fuzzy: o método de inferência fuzzy consiste na aplicação de regras heurísticas que relacionam as variáveis de entrada às variáveis intermediárias e estas às de saída (SHAW e SIMÕES, 1999). Na literatura, uma das poucas referências encontradas sobre a análise comparativa dos métodos de inferência relata que o método de inferência Máximo dos Mínimos é o que possui um menor erro (*Medium Square Error*) se comparado aos demais (Kiszka et al, 1985). A partir disso, e seguindo a tendência de uso das referências encontradas na literatura sobre a aplicação do sistema Mamdani (HISANO, 1993), (GEGOV e GOBALAKRISHNAN, 2007), (YUSOFF, 2007), (HAMAM e GEORGANAS, 2008), fez-se uso do método Máximo (etapa de agregação - união das contribuições das regras) dos Mínimos (etapa de implicação) a ser utilizado nos estudos de caso subsequentes – Figura 3.4

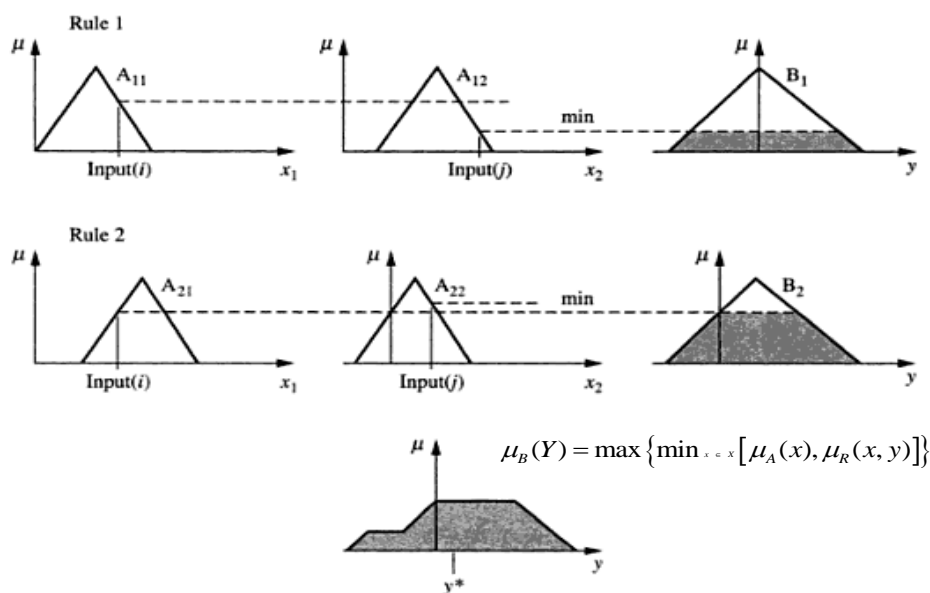


Figura 3.4 Método de Inferência do sistema Mamdani - Máximo dos Mínimos (Fonte: adaptado de ROSS, 2004).

3.4.3 Defuzzificadores

Defuzzificação é um método utilizado para transpor as saídas do domínio fuzzy para o domínio numérico crisp, sendo esta a última operação inversa da fuzzificação (SHAW e SIMÕES, 1999).

Os principais métodos de defuzzificação utilizados no sistema Mamdani são (VIRANT, 2000), (ROSS, 1995): Centro-da-Área (COA) ou Centro de Gravidade (COG), Centro da Soma (COS), Meio do Máximo (MOM), Menor do Máximo (SOM ou FOM),

Maior do Máximo (LOM), Centro da Maior Área (CLA) e Método da Altura (HM) ou Média Ponderada. Segundo Driankov et al (1996), o método Centro da Gravidade é o método de defuzzificação mais conhecido e estudado, justificando seu uso e aplicação. Para comparação do método COG com os demais métodos, pode-se considerar os seguintes aspectos (DRIANKOV et al, 1996):

- continuidade: determina que uma pequena alteração nos dados de entrada não deverá causar uma grande alteração nos dados de saída;

- não ambiguidade: caso haja duas áreas de duas funções de tipos distintos (trapezoidal e triangular) que constituem de forma conjunta o controle para saída, o método de defuzzificação não pode optar entre essas duas áreas, pois isso seria uma ambiguidade;

- plausibilidade: todo controle de saída de defuzzificação possui uma componente horizontal e uma componente vertical;

- complexidade computacional: depende da complexidade matemática do cálculo de defuzzificação e, conseqüentemente, do tempo de processamento do algoritmo;

- *weight counting* – se refere a forma com que o método de defuzzificação avalia os pesos dados a cada uma das regras criadas no sistema; como para a metodologia desenvolvida nesta tese não foram atribuídos pesos diretos as regras (no formato numérico), esta característica não possui qualquer implicação.

Estes aspectos podem ser melhor comparados através da Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Comparação entre os métodos de defuzzificação (DRIANKOV et al, 1996).

| | COG | COS | MOM | FOM | LOM | HM | CLA |
|----------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Continuidade | Sim | Sim | Não | Não | Não | Sim | Não |
| Não- ambig. | Sim | Sim | Sim | Sim | Sim | Sim | Não |
| Plausibilidade | Sim | Sim | Não | Não | Não | Sim | Sim |
| Complex. C. | Lento | Rápido | Rápido | Rápido | Rápido | Rápido | Rápido |
| <i>Weight count.</i> | Não | Sim | Não | Não | Não | Sim | Não |

Observando os resultados da Tabela 3.3, é possível perceber que os métodos COG, COS e HM possuem as necessidades essenciais que corroboram a aplicação dos mesmos para utilização na metodologia de ajuda a decisão desenvolvida nesta tese, considerando que neste estudo o aspecto “*weight counting*” não será de utilidade – não há pesos estipulados de forma numérica (0 a 1) a cada uma das regras – assim como aspecto complexidade computacional –

não faz diferença para o processamento dos resultados (velocidade de processamento) devido a evolução computacional atualmente alcançada. O método COG foi utilizado para o desenvolvimento e aplicação da metodologia difusa proposta, sendo o único dentre os três métodos validados por Driankov et al (1996) disponível à aplicação no fuzzy toolbox do Software MATLAB®.

O método de defuzzificação centro da área, também denominado centro de gravidade ou centróide faz uso da Equação 3.2:

$$Z^* = \frac{\int \mu_c(z) \cdot z \cdot dz}{\int \mu_c(z) \cdot dz}, \quad (3.2)$$

tendo os valores reais ou pontuações dos critérios (z) com seus níveis de prioridade $\mu_c(z)$. Este método determina o centro da área abaixo da função de pertinência combinada, Figura 3.5, considerando a área da união como um todo.

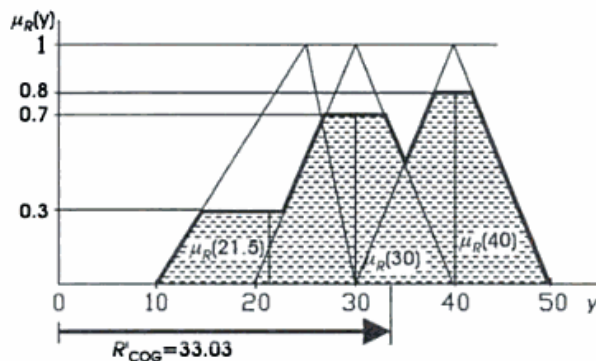


Figura 3.5 Método defuzzificação - Centro de Gravidade (Fonte: Virant, 2000).

3.5 Considerações finais do capítulo 3

Como visto neste Capítulo, pode-se concluir que análises monocriterais, que regem grande parte dos projetos de geração, devem ser substituídas por análises multicriterais que permitam a avaliação e a satisfação de diversos critérios. Com estas análises, é possível obter uma solução mais satisfatória que tende a incorporar de forma clara as preferências dos principais interessados, considerando cada processo decisório em questão.

Avaliando o estado da arte apresentado neste capítulo, pode-se perceber que mesmo com a predominância de análises monocriterais na área de planejamento de energia elétrica, é

possível encontrar diversos estudos multicriteriais com este intuito desde a década de oitenta até os anos mais recentes.

Em se tratando da escolha dos métodos a serem avaliados, as aplicações do método AHP encontradas na literatura demonstram a sua importância como ferramenta para a seleção de sistemas de geração de energia. Desta forma, o uso do método AHP nos estudos preliminares – Apêndice B – é totalmente justificável, desde que se tenha um conhecimento prévio de suas características e limitações, associados às argumentações de Bana e Vansnick (2008). Na utilização da lógica difusa, baseada no uso de regras e conjuntos fuzzy, para a seleção de sistemas de geração e armazenamento de energia elétrica, foi constatada inexistência de estudos atuais com este objetivo. Para a aplicação da lógica difusa a partir da seleção do controlador Mamdani de forma devidamente justificada, foram descritos e avaliados os possíveis fuzzificadores, métodos de inferência – assim como os passos para realização desta etapa de inferência – e defuzzificadores. Fazendo uso destas avaliações e juntamente com uma pesquisa bibliográfica concisa, foi selecionado para o desenvolvimento da metodologia de ajuda a decisão proposta nesta tese o sistema Mamdani com a utilização de uma função de pertinência triangular padronizada aplicada a inferência Máximo dos Mínimos e a defuzzificação pelo Centro de Gravidade.

4 A MODELAGEM DIFUSA

O foco deste Capítulo é a definição da etapa de relevância prévia, a criação das meta-regras, e o modo construtivo das regras no formato “escada”. Antes de descrever os aprimoramentos propostos à metodologia de apoio a decisão, deve-se ter conhecimento que esses aperfeiçoamentos só foram possíveis a partir das avaliações comparativas dos estudos preliminares – Apêndice B.

4.1 Aplicação inicial da metodologia de apoio a decisão baseada na modelagem difusa – suporte ao desenvolvimento dos aperfeiçoamentos

Com relação a escolha pelo número e formato das funções de pertinência aplicadas as variáveis fuzzy inicialmente propostas – estudos preliminares – devem ser observadas as seguintes considerações: aos critérios com maior prioridade (dominantes) foram atribuídas mais funções de pertinência, propiciando uma maior precisão na saída de dados fuzzy para estes casos; ou seja, os critérios mais importantes definidos na etapa de relevância prévia possuíam mais funções de pertinência que os critérios com menos prioridades. O formato das funções (conjuntos fuzzy) tinha como embasamento, além na maior disseminação de uso encontrada na literatura (PEDRYCZ, 1994), a etapa de relevância prévia. Desta forma, aos critérios dominantes foram atribuídos funções triangulares, pois o número de funções estipulados a estes critérios (cinco) proporcionava uma base menor em cada função de pertinência, aumentando a precisão da resposta final (maior cruzamento e acionamento de regras). Por outro lado, os critérios não-dominantes (menos prioritários), foram definidos com três funções de pertinência. Considerando que a base de cada função destes últimos critérios era bem maior, se comparada ao caso anterior, foi adotada a forma trapezoidal para função. Ainda, pode-se observar que as funções trapezoidais definidas admitiam alterações na simetria da base. Mesmo que as variações de simetria pudessem ser justificadas pela análise das características de cada critério, estas justificativas poderiam ser muito subjetivas, gerando diversas controvérsias entre os interessados ao processo decisório.

Em se tratando da criação da etapa de relevância prévia dos critérios na modelagem difusa, percebeu-se que, embora esta relevância diminuísse consideravelmente o número de

regras e facilitasse o entendimento da metodologia, sua aplicação nas variáveis fuzzy criadas acarretava a seguinte dificuldade: como as variáveis fuzzy eram construídas especificamente para cada critério, quaisquer alterações a serem analisadas na modelagem difusa (modificando o número de funções de pertinência e o formato das mesmas) implicavam em uma trabalhosa modificação nas regras. Outra dificuldade verificada é que não havia possibilidade de trocas de posição na relevância prévia, limitando o uso da modelagem apenas para perspectivas pré-estabelecidas. Além disso, é interessante observar que um dos principais objetivos propostos inicialmente à etapa de relevância prévia era a redução das regras criadas. Este objetivo é facilmente justificado, visto que é mais fácil manusear, entender e validar um número menor de regras. Por outro lado, a exclusão excessiva de regras – consequência de corte, em um processo de inferência fuzzy – tende a causar problemas na base de regras, como a não continuidade a assimetrias que são, muitas vezes, difícil de justificar, podendo até propiciar inconsistências sem quaisquer justificativas. Exemplos destas argumentações podem ser verificados na Tabela 4.1.

Tabela 4,1 – Efeitos da consequência de corte em uma base de regras (processo de inferência). Tabela 4.1a – conjunto de valores de pertinência a esquerda; Tabela 4.1b – conjunto de valores a direita. Sendo: muito baixo - VL, baixo - L, médio - M, alto - H e muito alto - VH.

| C,D,E,F = VH – E,F se for o caso. | | | | | | |
|-----------------------------------|-----------|-----------|----------|----------|----------|-----------|
| B | VH | <u>VL</u> | VH | VH | VH | <u>VH</u> |
| | H | <u>VL</u> | L | H | H | <u>H</u> |
| | M | <u>VL</u> | L | H | H | <u>H</u> |
| | L | <u>VL</u> | L | M | M | <u>H</u> |
| | VL | <u>VL</u> | VL | VL | VL | <u>H</u> |
| | | VL | L | M | H | VH |
| A | | | | | | |

| C = VL; D = VL E,F = VH | | | | | | |
|-------------------------|-----------|-----------|----------|----------|----------|-----------|
| B | VH | M | H | H | H | VH |
| | H | M | H | H | H | H |
| | M | M | H | M | H | H |
| | L | M | M | M | H | H |
| | VL | M | H | H | H | VH |
| | | VL | L | M | H | VH |
| A | | | | | | |

Na Tabela 4.1a há um comparativo para determinado conjuntos de regras fuzzy onde para os critérios A e B é ilustrado uma variação do grau de pertinência, e para os demais critérios este grau permanece constante – muito alto (todos os valores internos da Tabela representam a saída S). A partir da aplicação de regras de corte neste exemplo apresentado na Tabela 4.1a, onde se “A=VL ENTÃO S=VL” (valores sublinhados na Tabela 4.1a), percebe-se uma não continuidade dos resultados sendo que em B=VH com A=VL e A=L existe um “pulo” de saídas S=VL para S= VH.

Esta não continuidade pode ser justificada no desenvolvimento da metodologia conforme a aplicação de determinadas meta-regras (em detalhes nas seções subsequentes). O

que exige maior cuidado, e que deve possuir uma justificativa bem coerente, é a não simetria da modelagem.

Considerando novamente a regra de corte SE “A=VL ENTÃO S=VL”, para um sistema ser simétrico é necessário que seja definida outra meta-regra “SE A=VH ENTÃO S=VH”. Como pode ser observado na Tabela 4.1a, isto não acontece, apresentando diferentes saídas para as variações de B quando A=VH. Esta é uma modelagem assimétrica onde resultados ruins são evitados, mas não há priorização de resultados quando A=VH.

Em relação às inconsistências, na Tabela 4.1b é possível analisar os seguintes aspectos, “SE B=H e A=VL, ENTÃO S= M” e “SE B=VL e A=H, ENTÃO S= H”. Isto pode ser justificado pelas preferências do AD, no qual o critério A seria mais importante (maior relevância) que o critério B. Por outro lado, seguindo este raciocínio, não poderia acontecer o oposto – o critério B mais importante que A na mesma base de regras onde “SE A=M e B=L, ENTÃO S= M” e “SE B=M e A=L, ENTÃO S= H”. Este é um exemplo clássico de inconsistência que pode ser encontrado em uma base de regras e não possui qualquer justificativa. Nos estudos iniciais teve-se cuidado com inconsistências, por outro lado foram observadas várias discontinuidades e assimetrias que poderiam ser consideradas de difícil justificativa.

A partir destas argumentações, optou-se pelo desenvolvimento de uma modelagem difusa que, embora ainda tomasse como base a etapa de relevância prévia dos critérios – etapa essencial – não gerasse tais controvérsias e ainda possibilitasse quaisquer alterações de posição de relevância entre os critérios, permitindo aos principais interessados editar ou incluir novos critérios e criar suas próprias perspectivas.

4.2 Avaliação e incorporação dos critérios a modelagem difusa

4.2.1 Participação dos agentes de decisão

Sobre o desenvolvimento do processo de decisão, é essencial a incorporação das preferências dos denominados agentes de decisão (AD). Apenas a intervenção do AD vai permitir chegar a uma conclusão resultante da conjugação das suas preferências aos critérios em questão. Desta forma, o AD é a pessoa que, acima de tudo, define os critérios e como esses serão considerados (juntamente com suas relações), eventualmente com o suporte de especialistas (responsáveis pela criação e edição do método de decisão em questão). Estes ADs são capazes de:

- selecionar e validar os critérios a serem analisados;
- definir as perspectivas a serem avaliadas;
- estabelecer a ordem de prioridade (relevância) destes critérios, modificando o posicionamento dos mesmos na etapa de relevância prévia (pré-classificação por importância) de acordo com os interesses da entidade ao qual o tomador de decisão representa;
- participar da elaboração e seleção das meta-regras para a construção das regras no processo de inferência fuzzy, atribuindo diferentes importâncias relacionadas a etapa de relevância prévia dos critérios;
- definir as pontuações aos critérios qualitativos² conforme as características regionais, políticas e sociais de cada estudo de caso, assim como, se for o caso para determinados critérios, considerar os interesses da entidade ao qual o AD representa.

O questionário base aplicado a todos os ADs envolvidos no processo decisório em questão – com intuito de assimilar as preferências destes ADs – está apresentado no Apêndice D.

4.2.2 Incorporação dos critérios quantitativos e qualitativos a modelagem desenvolvida

Para introdução dos valores reais dos critérios quantitativos na metodologia de apoio a decisão proposta é necessária a realização de um processo de normalização dos dados de entrada através das Equações 4.1 e 4.2 (EKEL e POPOV, 1995).

A Equação 4.1 atribui valores normalizados de 0 a 1,0 aos valores reais para a entrada de valores na metodologia proposta, sendo necessário buscar os valores máximos dos critérios quantitativos, como por exemplo, critério eficiência (quanto maior, melhor).

$$VN(x) = \frac{V_r(x) - \min V_r(x)}{\max V_r(x) - \min V_r(x)} \quad (4.1)$$

A Equação 4.2 atribui valores normalizados de 0 a 1,0 aos valores reais, sendo necessário buscar os valores mínimos dos critérios quantitativos, como por exemplo, critério custos (quanto menor, melhor).

² Na concretização de critérios de natureza qualitativa em atributos mensuráveis é usual recorrer a indicadores numéricos (por vezes mais do que um), que têm a vantagem de serem objetivos, mas podem não representar adequadamente o conceito que se pretende avaliar, o que exige cautela, clareza e transparência na sua definição (Matos, 2010).

$$VN(x) = \frac{máxV_r(x) - V_r(x)}{máxV_r(x) - mínV_r(x)} \quad (4.2)$$

onde: $VN(x)$ representa o resultado final normalizado, $V_r(x)$ representa o valor real do critério em análise, $mínV_r(x)$ e $máxV_r(x)$ representam os valores reais mínimos e máximos.

A análise dos critérios qualitativos toma como base as pontuações estipuladas pelos agentes de decisão. Para a definição das pontuações finais de forma quantificada, primeiramente os ADs atribuem as pontuações individualmente tomando como base uma escala de 0 a 1,0, onde 1,0 significa a pontuação máxima – intensidade máxima. Em um segundo momento as pontuações são discutidas entre os ADs (se houver mais de um AD para uma mesma avaliação) com intuito de eliminar, ou reduzir, discordâncias muito significativas entre as pontuações dadas por diferentes ADs para um mesmo critério qualitativo. É importante salientar que estas pontuações devem ser definidas por ADs experientes. Mesmo assim, em alguns casos as pontuações podem ser consideradas subjetivas, havendo a possibilidade de discordâncias entre pontuações estipuladas por diferentes ADs. A eliminação destas discordâncias é uma etapa fundamental para o não comprometimento dos resultados finais. Apenas depois desta discussão (consenso final) deve ser calculada a média das pontuações parciais dos ADs, resultando nas pontuações finais. Por fim, a análise dos ADs deve ser concebida não apenas de acordo com dados baseados em fontes bibliográficas confiáveis, mas também considerando a realidade local, avaliando as relações entre os critérios analisados juntamente as condições econômicas, sociais e ambientais da região onde prevê-se a instalação do sistema de geração

4.3 Descrição das principais etapas da modelagem difusa desenvolvida

Para a construção da base de regras e seleção e delimitação das funções utilizadas na nova metodologia de apoio a decisão, tomaram-se como base os seguintes argumentos, considerando ainda a etapa de relevância prévia dos critérios.

1º) padronização da variável fuzzy (Figura 4.1): todos os conjuntos fuzzy definidos (entrada de dados e saída final dos resultados) possuem formato triangular e são compostos por cinco funções de pertinência (muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto) o que propicia uma precisão maior na saída de dados fuzzy. Ainda, este ajuste possibilita quaisquer futuras

alterações de posição na ordem da relevância prévia dos critérios, propiciando uma maior mobilidade com a criação de diferentes perspectivas.

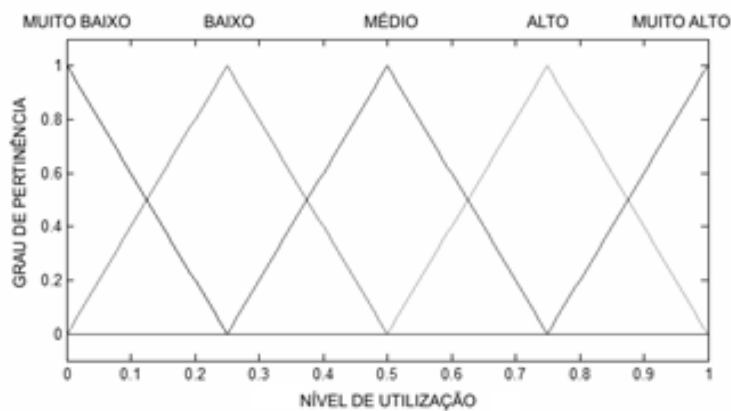


Figura 4.1 Variável Fuzzy padrão entrada e saída (Fonte: Software MATLAB®).

2º) etapa de relevância prévia: possibilita a análise de até seis critérios de entrada A, B, C, D, E e F com prioridade decrescente de A a F – para as modelagens propostas; não há limitação de critérios a serem avaliados seguindo o formato construtivo das regras em escada.

3º) criação de meta-regras: a construção das meta-regras tem como objetivo clarificar e auxiliar a construção e aplicação das regras do processo de inferência fuzzy. Nesta etapa o agente de decisão pode desenvolver as meta-regras (em conjunto com o especialista responsável pela criação e edição do método de decisão em questão), e/ou escolher as meta-regras que serão utilizadas mediante um grupo de meta-regras já existente. Estas meta-regras foram classificadas em diferentes denominações conforme a sua ação na base de regras, sendo aplicadas na seguinte ordem: Meta-regra Base, Meta-regra Genérica de Construção, Meta-regra de Construção início/fim, Meta-regra de Construção e Adição de Critérios, e demais Meta-regras de Aferição conforme preferências do AD.

4º) formato de apresentação e construção das meta-regras e regras denominado de “escada” que permite a eliminação de inconsistências, não continuidades e assimetrias indesejadas, assim como uma completa visualização de todas as regras da modelagem desenvolvida.

Um exemplo de como construir esta nova modelagem proposta, passo a passo, é apresentado a seguir tomando como base a modelagem 1 aplicada no estudo de caso principal.

Para a criação de uma modelagem, inicialmente o AD deve escolher quantos critérios serão avaliados. Em seguida, o AD estabelece uma forma construtiva a perspectiva base – via etapa de relevância dos critérios – por exemplo:

Etapa de relevância dos critérios – 1° A, 2° B, 3° C e D, 4° E e F.

A aplicação e criação das meta-regras estará relacionada com a etapa de relevância (forma de construção das perspectivas para cada modelagem) que o AD estabeleceu para o problema em questão.

Para o desenvolvimento das meta-regras, primeiramente, deve-se ter conhecimento da Meta-regra Base que não pode ser alterada, por uma questão de raciocínio lógico.

Meta-regra Base - SE $A = B = C = D$, ENTÃO $S = A$; (não modificável – base).

Como explicado anteriormente, a variável fuzzy é padronizada com um formato triangular e cinco funções de pertinência (muito baixo - VL, baixo - L, médio - M, alto - H e muito alto - VH). Com essas informações, pode-se iniciar a avaliação das demais meta-regras criadas para o estudo de caso em questão.

A Meta-regra Genérica de Construção define o modo construtivo das regras, estabelecendo quando deve haver uma mudança (elevação) no grau de pertinência na variável de saída (S), respeitando sempre a Meta-regra Base. Por exemplo, alteração de 3 em 3 saídas (S):

1. SE $A = VL$ e $B = VL$ e $C = VL$ e $D = VL$, ENTÃO $S = VL$.
2. SE $A = VL$ e $B = VL$ e $C = VL$ e $D = L$, ENTÃO $S = VL$.
3. SE $A = VL$ e $B = VL$ e $C = VL$ e $D = M$, ENTÃO $S = VL$; (última com grau VL).
4. SE $A = VL$ e $B = VL$ e $C = VL$ e $D = H$, ENTÃO $S = L$; (primeira com grau L).

Alteração de 4 em 4 saídas (S):

1. SE $A = VL$ e $B = VL$ e $C = VL$ e $D = VL$, ENTÃO $S = VL$.
2. SE $A = VL$ e $B = VL$ e $C = VL$ e $D = L$, ENTÃO $S = VL$.
3. SE $A = VL$ e $B = VL$ e $C = VL$ e $D = M$, ENTÃO $S = VL$.
4. SE $A = VL$ e $B = VL$ e $C = VL$ e $D = H$, ENTÃO $S = VL$; (última com grau VL).
5. SE $A = VL$ e $B = VL$ e $C = VL$ e $D = VH$, ENTÃO $S = L$; (primeira com grau L).

Lembrando novamente que sempre a Meta-regra Base deve ser respeitada. A próxima meta-regra a ser utilizada é a Meta-regra de Construção início/fim. Esta meta-regra define o ponto de início e fim onde a Meta-regra Genérica irá ser aplicada. O uso desta meta-regra é opcional, sendo que sua função é atribuir uma maior relevância aos critérios mais prioritários. São exemplos desta meta-regra:

- 1a. SE $A = VL$ e $B = VL$ e $C = VL$, ENTÃO $S = VL$; para quaisquer demais variações de D, E, F. (construção/iniciação, maior relevância aos critérios A, B e C)

1b. SE $A = VH$ e $B = VH$ e $C = VH$, ENTÃO $S = VH$; para quaisquer variações de D , E , F . (construção/finalização).

É interessante observar que existe uma simetria nas meta-regras acima, em que a imposição feita ao grau de pertinência mais baixo (VL) também é feita ao grau mais alto (VH). Esta simetria é aconselhável, mas não obrigatória, desde que haja uma boa razão – explicação de preferência do AD – para esta não ser seguida. Uma explicação coerente para que a simetria não seja seguida é se, por exemplo, apenas a meta-regra 1a fosse adotada, então este sistema de inferência evitaria resultados finais ruins, dando uma boa margem de segurança onde a avaliação de critérios com características ruins, que correspondem a graus de pertinência muito baixos, resultaria em uma resposta muito baixa que nunca seria selecionada. Ainda, neste caso, os melhores resultados seguiriam a base construtiva e demais meta-regras, não havendo obrigatoriedade de seleção positiva sem a análise dos critérios D , E e F imposta pela meta-regra 1b – sem ponto de finalização. Embora no exemplo acima, a não aplicação da meta-regra 1b não propicie alterações significativas nos resultados finais, caso esta meta-regra resultasse em uma grande consequência de corte (ver modelagem 2 – Apêndice A), a não utilização de uma simetria poderia resultar em modificações decisivas no processo de seleção.

Nesta modelagem os critérios E e F são utilizados apenas como modo de adição (aumento de classificação na saída S) A partir disso, tem-se a criação da Meta-regra de Construção e Adição, sendo que estes critérios apenas adicionam valores (graus) de pertinência ao valor de saída (S), e nunca reduzem. Esta meta-regra está diretamente relacionada com a Meta-regra Genérica de Construção. Um bom exemplo desta meta-regra acontece no caso abaixo, onde há uma elevação no valor de pertinência da saída (S) com a análise/adição do critério E apenas quando $S \geq M$ (podendo aumentar o grau da Saída para H).

1. SE $A = L$ e $B = L$ e $C = VH$ e $D = VL$, ENTÃO $S = L$.

2. SE $A = L$ e $B = L$ e $C = VH$ e $D = L$, ENTÃO $S = M$.

3. SE $A = L$ e $B = L$ e $C = VH$ e $D = M$, ENTÃO $S = M$.

4. SE $A = L$ e $B = L$ e $C = VH$ e $D = H$, ENTÃO $S = M$.

5. SE $A = L$ e $B = L$ e $C = VH$ e $D = VH$, ENTÃO $S = M * H$, e para $M * H =$

6. SE $A = L$ e $B = L$ e $C = VH$ e $D = VH$ e $E = VL$, ENTÃO $S = M$; (*nunca reduz S*).

7. SE $A = L$ e $B = L$ e $C = VH$ e $D = VH$ e $E = L$, ENTÃO $S = M$;

8. SE $A = L$ e $B = L$ e $C = VH$ e $D = VH$ e $E = M$, ENTÃO $S = M$;

9. SE $A = L$ e $B = L$ e $C = VH$ e $D = VH$ e $E = H$, ENTÃO $S = M$;

10. SE $A = L$ e $B = L$ e $C = VH$ e $D = VH$ e $E = VH$, ENTÃO $S = H$; (aumento de valor).

Ou ainda, noutro exemplo:

1. SE A= L e B= M e C = VH e D = VL, ENTÃO S = M.
2. SE A= L e B= M e C = VH e D = L, ENTÃO S = M.
3. SE A= L e B= M e C = VH e D = M, ENTÃO S = M.
- SE A= L e B= M e C = VH e D = H, ENTÃO S = M^{*H}, e para M^{*H} =
 4. SE A= L e B= M e C = VH e D = H e E = VL, ENTÃO S = M;
 5. SE A= L e B= M e C = VH e D = H e E = L, ENTÃO S = M;
 6. SE A= L e B= M e C = VH e D = H e E = M, ENTÃO S = M;
 7. SE A= L e B= M e C = VH e D = H e E = H, ENTÃO S = M;
 8. SE A= L e B= M e C = VH e D = H e E = VH, ENTÃO S = H; (aumento de valor).
- SE A= L e B= M e C = VH e D = VH, ENTÃO S = M^{#H}, e para M^{#H} =
 9. SE A= L e B= M e C = VH e D = VH e E = VL, ENTÃO S = M;
 10. SE A= L e B= M e C = VH e D = VH e E = L, ENTÃO S = M;
 11. SE A= L e B= M e C = VH e D = VH e E = M, ENTÃO S = M;
 12. SE A= L e B= M e C = VH e D = VH e E = H, ENTÃO S = H (aumento de valor).;
 13. SE A= L e B= M e C = VH e D = VH e E = VH, ENTÃO S = H; (aumento de valor).

É importante lembrar a relação desta meta-regra com a Meta-regra Genérica de Construção. Como podemos observar nos exemplos de regras acima, temos uma elevação no valor da saída de 3 em 3, e após o terceiro valor de saída S=M, ao invés de haver um S=H, há a atribuição da meta-regra de construção e adição estipulando S= M^{*H} (a atuação desta regra é representada por ^{*H} quando o valor de saída alcança H apenas com E = VH) e S=M^{#H} (a atuação desta regra é representada por ^{#H} quando o valor de saída alcança H com E = H).

O AD pode decidir se esta regra também vai ser adotada no aumento do valor da saída de L para M ou H para VH, por exemplo, mas sempre respeitando a Meta-Regra Base. Para o estudo de caso principal desenvolvido nesta tese, foi adotado a adição do critério E no aumento do valor de saída de M para H, e a adição dos critérios E e F no aumento do valor de saída de H para VH. Isto toma como justificativa a importância das saídas H e VH que tendem a representar as alternativas que serão selecionadas.

Por fim, têm-se as demais Meta-regras de Aferição estabelecidas conforme preferências dos ADs, com intuito de acrescentar ou reduzir as relevâncias (importância) de determinados critérios, seguindo a etapa de relevância previamente definida, ou seja, se certa Meta-regra de Aferição atribuir relevância a B, tem que haver outra que atribua maior ou igual relevância a A, respeitando a ordem de relevância da classificação prévia.

São exemplos das Meta-regras de Aferição:

2a. SE $A = VL$, ENTÃO $S \leq M$; para quaisquer variações de B, C, D, E, F. (aferição)

2b. SE $A = VH$, ENTÃO $S \geq M$; para quaisquer variações de B, C, D, E, F. (aferição)

2c. SE $A = L$, ENTÃO $S \leq H$; para quaisquer variações de B, C, D, E, F. (aferição)

2d. SE $A = H$, ENTÃO $S \geq L$; para quaisquer variações de B, C, D, E, F. (aferição)

3a. SE $A < L$ e $B < M$, ENTÃO $S \leq L$; para e quaisquer variações de C, D, E, F. (aferição)

3b. SE $A < M$ e $B < H$, ENTÃO $S \leq M$. para e quaisquer variações de C, D, E, F. (aferição)

3c. SE $A > M$ e $B > L$, ENTÃO $S > L$. para e quaisquer variações de C, D, E, F. (aferição)

3d. SE $A > H$ e $B > M$, ENTÃO $S > M$. para e quaisquer variações de C, D, E, F. (aferição)

O conjunto de meta-regras 2 (2a, 2b, 2c, 2d) atribui uma determinada relevância ao critério A em superioridade aos demais, obedecendo uma simetria. O conjunto de meta-regras 3 atribui uma determinada relevância aos critérios A e B em superioridade aos demais, também obedecendo uma simetria. Deve-se observar que para todas as meta-regras aplicadas a um estudo de caso em particular é necessário definir a ordem de atuação destas meta-regras; caso duas meta-regras atuem sobre a mesma regra, apenas a meta-regra mais prioritária irá ser imposta.

4.4 Principais aspectos referentes a Modelagem 1 .

A partir dos esclarecimentos descritos na seção anterior em relação à etapa de relevância, meta-regras e regras, já é possível detalhar os processos de modelagem realizados nesta tese. Para avaliação do estudo de caso principal foram desenvolvidas três diferentes modelagens. A modelagem 1 segue as meta-regras exemplificadas na seção anterior. A modelagem 2, apresentada em detalhes no Apêndice A, faz uso de novas meta-regras de aferição que poderiam ser selecionadas por ADs. Por fim, a modelagem 3, também apresentada no Apêndice A, faz uso apenas das meta-regras Base e Genérica de Construção (para modelagem 3, alteração de 4 em 4 saídas), sendo denominada de Modelagem Original, sem quaisquer relevâncias entre os critérios.

A modelagem proposta, selecionada e avaliada pelos ADs para uso no estudo caso de caso principal é a Modelagem 1. As demais modelagens servem para comparar e analisar os resultados finais obtidos, com intuito de gerar discussões em torno do problema em questão relacionado a metodologia de ajuda a decisão aplicada.

4.4.1 Base construtiva da modelagem 1 – regras e meta-regras

Na Tabela 4.2 é apresentada a base construtiva da modelagem 1, demonstrando a aplicação das Meta-regras Base, Genérica e de Construção, o que permite o desenvolvimento de todas as regras do processo de inferência – modelagem 1. O conjunto de Tabelas apresentando toda base de regras criadas a modelagem 1 – em detalhes – com a aplicação das Meta-regras de Aferição pode ser verificado no Apêndice A.

É interessante recordar ainda as meta-regras de Aferição utilizadas nesta modelagem

SE $A = VL$, ENTÃO $S \leq M$; para quaisquer variações de B, C, D, E, F.

SE $A = VH$, ENTÃO $S \geq M$; para quaisquer variações de B, C, D, E, F.

SE $A = L$, ENTÃO $S \leq H$; para quaisquer variações de B, C, D, E, F.

SE $A = H$, ENTÃO $S \geq L$; para quaisquer variações de B, C, D, E, F.

SE $A < L$ e $B < M$, ENTÃO $S \leq L$; para e quaisquer variações de C, D, E, F.

SE $A < M$ e $B < H$, ENTÃO $S \leq M$. para e quaisquer variações de C, D, E, F.

SE $A > M$ e $B > L$, ENTÃO $S > L$. para e quaisquer variações de C, D, E, F.

SE $A > H$ e $B > M$, ENTÃO $S > M$. para e quaisquer variações de C, D, E, F.

Lembrando que a etapa de relevância da modelagem 1 (Perspectiva Base) segue a seguinte prioridade – 1° A, 2° B, 3° C, 4° D, 5° E, 6° F.

Tabela 4.2 – Base construtiva das regras de forma simplificada - Modelagem 1.

| | | <i>A=VL</i> | | | | | <i>A=L</i> | <i>A=Med</i> | <i>A=H</i> | <i>A=VH</i> |
|---------------------------------------|-------------|-----------------------------|------------|----------------------------|-----------------|----------------------------|-----------------|----------------------------|------------------|-----------------------------|
| | | <i>B=VL</i> | <i>B=L</i> | <i>B=M</i> | <i>B=H</i> | <i>B=VH</i> | <i>B=VH</i> | <i>B=VH</i> | <i>B=VH</i> | <i>B=VH</i> |
| <i>C</i> = <i>V</i> <i>L</i> | <i>D=VL</i> | VL <small>(BASE)</small> | VL | VL | VL | L | L | L | M | M |
| | <i>D=L</i> | VL | VL | VL | L | L | L | M | M | M |
| | <i>D=M</i> | VL | VL | L | L | L | M | M | M | M* ^H |
| | <i>D=H</i> | VL | L | L | L | M | M | M | M* ^H | M ^{#H} |
| | <i>D=VH</i> | VL | L | L | M | M | M | M* ^H | M ^{#H} | H |
| | | <small>.....Início</small> | | | | | | | | |
| <i>C</i> = <i>L</i> | <i>D=VL</i> | VL | VL | VL | L | L | L | M | M | M |
| | <i>D=L</i> | VL | VL | L <small>(BASE)</small> | L | L | L | M | M | M* ^H |
| | <i>D=M</i> | VL | L | L | L | M | M | M | M* ^H | M ^{#H} |
| | <i>D=H</i> | L | L | L | M | M | M | M* ^H | M ^{#H} | H |
| | <i>D=VH</i> | L | L | M | M | M | M* ^H | M ^{#H} | H | H |
| <i>C</i> = <i>M</i> | <i>D=VL</i> | VL | VL | L | L | L | M | M | M | M* ^H |
| | <i>D=L</i> | VL | L | L | L | M | M | M | M* ^H | M ^{#H} |
| | <i>D=M</i> | L | L | L | M | M <small>(BASE)</small> | M | M* ^H | M ^{#H} | H |
| | <i>D=H</i> | L | L | M | M | M | M* ^H | M ^{#H} | H | H |
| | <i>D=VH</i> | L | M | M | M | M* ^H | M ^{#H} | H | H | H |
| <i>C</i> = <i>H</i> | <i>D=VL</i> | VL | L | L | L | M | M | M | M* ^H | M ^{#H} |
| | <i>D=L</i> | L | L | L | M | M | M | M* ^H | M ^{#H} | H |
| | <i>D=M</i> | L | L | M | M | M | M* ^H | M ^{#H} | H | H |
| | <i>D=H</i> | L | M | M | M | M* ^H | M ^{#H} | H <small>(BASE)</small> | H | H |
| | <i>D=VH</i> | M | M | M | M* ^H | M ^{#H} | H | H | H | H* ^{VH} |
| | | | | | | | | | | <small>.....Fim</small> |
| <i>C</i> = <i>V</i> <i>H</i> | <i>D=VL</i> | L | L | L | M | M | M | M* ^H | M ^{#H} | VH |
| | <i>D=L</i> | L | L | M | M | M | M* ^H | M ^{#H} | H | VH |
| | <i>D=M</i> | L | M | M | M | M* ^H | M ^{#H} | H | H | VH |
| | <i>D=H</i> | M | M | M | M* ^H | M ^{#H} | H | H | H | VH |
| | <i>D=VH</i> | M | M | M* ^H | M ^{#H} | H | H | H | H* ^{VH} | VH <small>(BASE)</small> |

Na Tabela 4.2 estão representadas as regras construídas na modelagem 1 de forma simplificada. Por exemplo, o critério $A=VL$ está representado com $B=VL, L, M, H$ e VH (observar as duas primeiras linhas da tabela); cada conjunto de 5 células separados por colunas representam $C=VL, L, M, H$ e VH (observar a primeira coluna da tabela); e cada célula dentro destes conjuntos representa $D=VL, L, M, H$ e VH (observar a segunda coluna da tabela). As células internas da tabela correspondem aos valores de saídas S da modelagem.

A construção das regras obedece a Meta-regra Genérica de Construção com alteração de 3 em 3 saídas, sendo este um processo em forma de “escada” – observe que os conjuntos de 5 células são correspondentes nas diagonais da tabela. Então, para avaliação de $A=L$, basta

excluir/suprimir a primeira coluna com a saída S (primeira coluna interna da tabela – letras que não estão em negrito) e a coluna seguinte que antes representava B=L com A=VL, passa agora a representar B=VL com A=L. Os demais valores de pertinência de A (A=M, H e VH) são obtidos da mesma forma, suprimindo a primeira coluna da análise anterior.

As células com a denominação “*BASE*” na Tabela 4.2, indicam onde as Meta-regras Base atuam, também servindo como ponto de referência para a clarificação da forma construtiva da tabela. O número final de regras construídas na modelagem 1 foi de 1082 regras. Considerando que a modelagem 1 faz uma avaliação de 6 critérios, caso não fossem utilizadas determinadas meta-regras, como a Meta-regra de Construção e Adição, o número final de regras na consideração de 6 critérios poderia chegar a 15625 regras. Este valor é baseado na equação apresentada por Ming-Ling Lee (2003), onde um controlador com uma única saída de dados e com n critérios de entrada e m funções de pertinência por critério é composto por x regras obtidas através da Equação 4.3.

$$x = m^n = 5^6 = 15625 \quad (4.3)$$

4.4.2 Análise gráfica da modelagem 1

Deve-se ter conhecimento que são as Meta-regras de Aferição e as Meta-regras de Construção início/fim com consequência de corte – se for o caso – as principais responsáveis por inserir significativas relevâncias aos critérios em questão. Analisando as regras construídas na Modelagem 1, é possível afirmar que sem a atuação das Meta-regras de Aferição os gráficos das funções A, B, C e D são exatamente idênticos, comprovando a não diferença de relevância entre estes critérios. A Figura 4.2 apresenta gráficos que, na Modelagem 1, poderiam ser atribuídos a qualquer um dos critérios de entrada simulados, ou da mesma forma, a quaisquer relações entre os critérios. Estas avaliações permitem ainda uma avaliação da consistência da construção das regras na modelagem em questão.

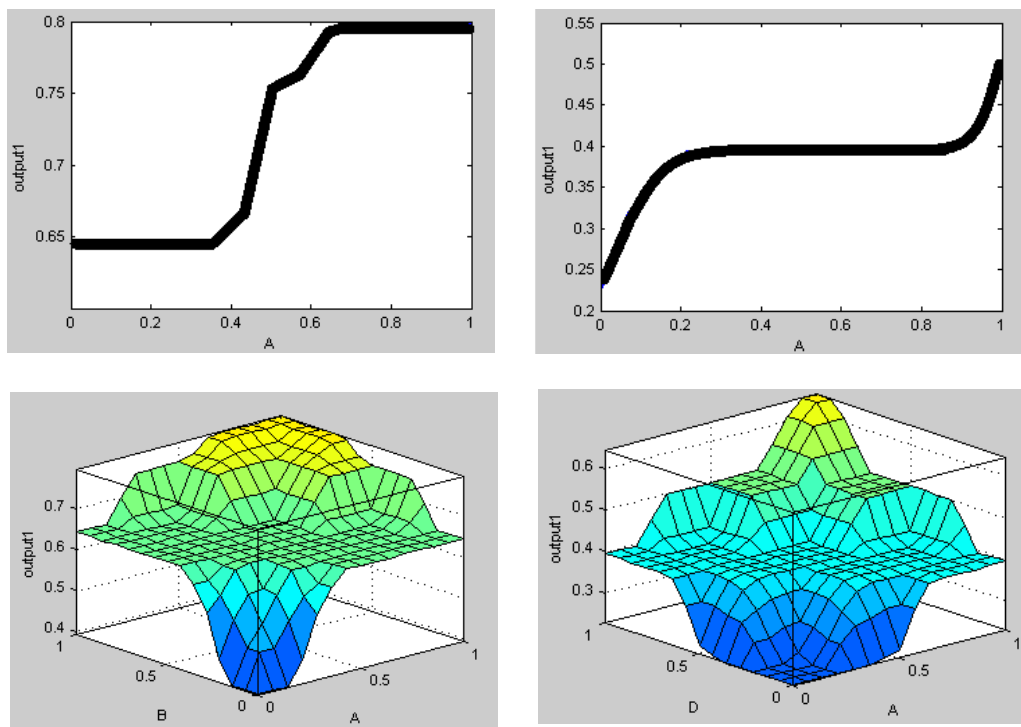


Figura 4.2 Comparativo referente a Modelagem 1 sem as meta-regras de aferição (Fonte: Software MATLAB®). Valores de saída (S) para diferentes entradas do critério A – idem para entradas dos critérios B, C, D³ (gráficos apresentados na parte superior da figura). Variação dos valores de saída (S) para quaisquer entradas de dois critérios em análise, B e A no exemplo (gráficos em 3D apresentados na parte inferior da figura) - sendo que a partir da definição do(s) critério(s) para análise os demais critérios são considerados com entrada fixa no valor de 0,9 (gráficos da esquerda) e entrada com valor de 0,4 (gráficos da direita).

Na Figura 4.3, representando a Modelagem 1, é ilustrado um comparativo da variação dos valores de entrada entre dois critérios selecionados, no exemplo B e A, mantendo os valores dos demais critérios em simulação no grau máximo de entrada (1,0); ilustrado o gráfico sem Meta-regras de Aferição a esquerda, e com Meta-regras de Aferição a direita.

Observando a Figura 4.3, percebe-se que a atuação da seguinte meta-regra propiciou o declive no gráfico a direita, sendo que:

SE A = VL, ENTÃO S ≤ M; para quaisquer variações de B, C, D, E, F. (aferição)

³ de fato, há uma pequena variação de relevância observada entre o critério D com os demais critérios, sendo esta atribuída pela Meta-regra de Construção início/fim estabelecida para esta modelagem, conforme definido nestas meta-regras:

SE A = VL e B = VL e C = VL, ENTÃO S = VL; para quaisquer variações de D, E, F.
SE A = VH e B = VH e C = VH, ENTÃO S = VH; para quaisquer variações de D, E, F

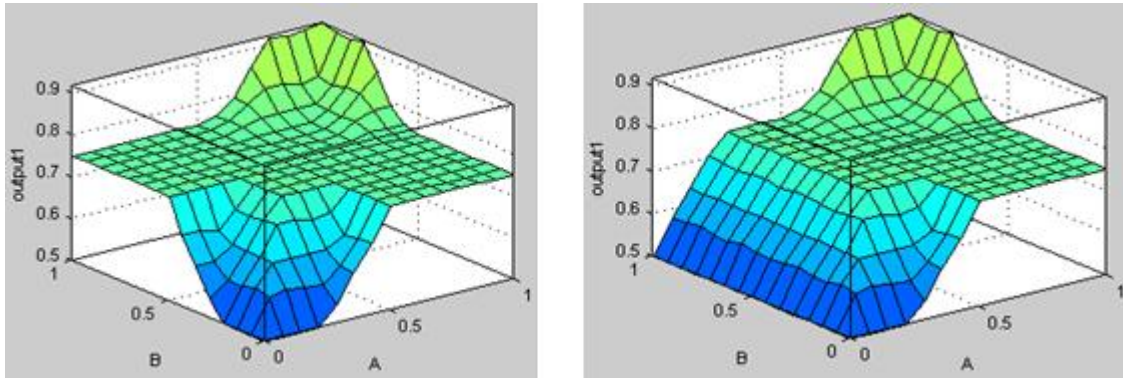


Figura 4.3 Comparativo da variação dos valores de entrada dos critérios A e B, sem Meta-regras de Aferição a esquerda e com Meta-regras de Aferição a direita (Fonte: Software MATLAB®).

4.5 Considerações finais do capítulo 4

No desenvolvimento da metodologia de ajuda a decisão, a criação da etapa de relevância prévia foi um aspecto base para a devida construção das regras, complementada com a criação das meta-regras e a forma construtiva das regras em “escada”.

A idéia inicial de criação da etapa de relevância prévia surgiu de a partir da observação de um dos passos desenvolvidos por Saaty no método AHP, onde os critérios possuem uma certa prioridade entre eles, definida nas comparações par a par apenas entre os critérios.

A devida relação da etapa de relevância prévia com as meta-regras é um aspecto chave que deve ser considerado. As Meta-regras Base e de Construção garantem a consistência e continuidade do conjunto de regras criado, possibilitando ainda a análise de simetria destas regras. As Meta-regras de Aferição, juntamente com as Meta-regras de Construção início/fim, são as principais responsáveis pela definição (diferenciação) da relevância entre os critérios na etapa de relevância prévia.

É necessário observar que o AD pode e deve ajudar a desenvolver estas meta-regras com o auxílio do especialista, ou simplesmente selecionar tais meta-regras a serem utilizadas, desde que sejam conhecidos os efeitos das mesmas na modelagem em questão.

Com os aprimoramentos apresentados, pode-se concluir que há uma maior participação do AD sobre o processo decisório a partir da seleção e inclusão de novos critérios, criação de perspectivas particulares, edição na posição dos critérios na etapa de

relevância, escolha de meta-regras específicas para a construção do sistema de inferência e verificação e entendimento da ação das meta-regras através da visualização da Tabela completa com todas as regras (modo construtivo seguindo o formato escada).

A partir destes aprimoramentos esta tese apresenta uma metodologia de apoio a decisão genérica que pode ser utilizada em diversos estudos de caso, como por exemplo, avaliação e seleção de diversos tipos de sistemas de geração e armazenamento de energia.

5 ESTUDO DE CASO PRINCIPAL – METODOLOGIA DE AJUDA A DECISÃO NA SELEÇÃO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Este capítulo descreve os principais aspectos referentes ao processo decisório em questão – seleção da tecnologia mais apropriada para geração de energia elétrica no aterro sanitário Caturrita II localizado na cidade de Santa Maria. Além disso, serão identificados os principais interessados e a forma de participação dos mesmos para resolução do problema em questão. Por fim são apresentados e avaliados os resultados finais das três modelagens desenvolvidas com a metodologia de ajuda a decisão difusa proposta.

5.1 Considerações iniciais

Como já citado anteriormente, o presente trabalho de doutorado visa desenvolver uma metodologia de ajuda a decisão a ser aplicada na seleção de um sistema de geração de energia elétrica de pequeno porte com biogás proveniente do tratamento de resíduos sólidos urbanos de aterros sanitários. Para o alcance deste objetivo, no processo de modelagem foram utilizadas regras e conjuntos fuzzy tomando como base a criação da etapa de relevância prévia, a aplicação de meta-regras e a forma construtiva das regras em “escada”. Avaliaram-se diversos critérios em diferentes perspectivas através do uso do software MATLAB®.

É importante salientar que a metodologia desenvolvida nesta tese pode ser aplicada em quaisquer tipos de aterros sanitários, de grande ou pequeno porte, desde que estes possuam uma licença para a geração de energia elétrica (atendendo requisitos mínimos de segurança ambiental estabelecidos pelos órgãos fiscalizadores). A seleção da tecnologia de geração elétrica em aterros sanitários irá depender da quantidade de toneladas de lixo diária recebida pelo aterro e da estimação da vida útil do mesmo. Estes dados estão incluídos nos critérios selecionados que serão ponderados pela metodologia desenvolvida.

5.2 Problemas decisórios e caracterização básica do processo decisório em questão

Considerando a existência de inúmeras imprecisões, hesitações e incertezas inerentes aos problemas decisórios, é necessário avaliar cuidadosamente a modelagem do problema e a análise de resultados. Segundo Keeney e Raiffa (1999), deve haver a estruturação de idéias e pensamentos relativos à situação em questão com o intuito de proporcionar a geração de alternativas e identificar novas oportunidades de decisão. Antes de partir para a aplicação de qualquer método de apoio a decisão, deve-se ter conhecimento sobre as características básicas relacionadas aos processos de decisões.

O processo decisório em questão – geração de energia elétrica no aterro sanitário Caturrita II – pode ser avaliado de forma global, como apresentado na Figura 5.1.

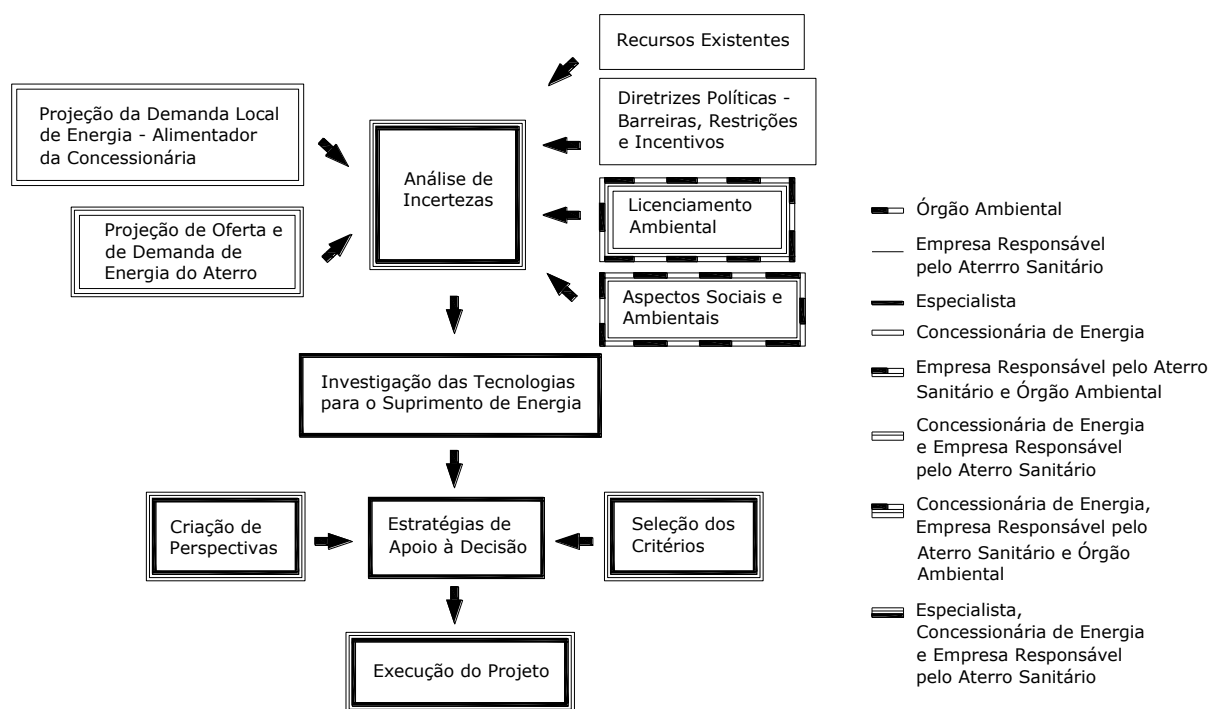


Figura 5.1 Principais aspectos envolvidos no processo decisório em questão.

Avaliando os aspectos apresentados na Figura 5.1, é possível distinguir as etapas e os interessados ao processo decisório. A concessionária de energia elétrica e a empresa responsável pelo aterro realizam a etapa de projeção de oferta e demanda de energia do aterro sanitário e, juntamente ao órgão competente, buscam o licenciamento ambiental que irá

permitir a implementação do sistema de geração de energia elétrica no aterro sanitário em questão. Ainda, avaliando a possibilidade de venda de excedentes energia elétrica gerada a partir do biogás produzido no aterro, a concessionária será responsável pelo levantamento da demanda local de energia – no alimentador da concessionária onde é prevista a conexão desta fonte – considerando demais consumidores da região que poderiam ser atendidos por esta geração. Cabe a empresa responsável pelo aterro investigar as diretrizes políticas, barreiras e incentivos a esta forma de geração de energia elétrica, considerando a redução da emissão de gases poluentes e demais benefícios ambientais e sociais. A avaliação dos recursos existentes também é função da empresa responsável pelo aterro; recursos estes, neste caso: quantidade, qualidade e vida útil (tempo de produção) do biogás existente para suprimento de energia no aterro – considerando ainda a possibilidade de venda de excedentes de energia elétrica junto a concessionária.

Cabe ao especialista o desenvolvimento da metodologia de ajuda a decisão a ser aplicada no processo decisório – estratégia para solução do problema – consultando os agentes de decisão da concessionária e da empresa responsável pelo aterro sanitário em questão. O auxílio de demais órgãos competentes, como a secretaria de meio ambiente do município, pode colaborar para a verificação do licenciamento ambiental e para as análises das modificações ambientais e sociais que ocorrerão no município ou localidade em questão – aspectos abordados na Seção 2.3. O especialista também está encarregado de fazer estudos prévios das tecnologias que poderiam ser avaliadas no estudo de caso em questão. Para definição dos critérios e das perspectivas a serem analisadas é interessante reunir a opinião de todos os interessados: agentes de decisão representando a concessionária de energia, a empresa responsável pelo aterro e a secretaria do meio ambiente do município – o especialista deve apresentar aos agentes de decisão os estudos prévios desenvolvidos. Por fim, deve-se enfatizar que a execução do projeto só pode ser realizada após uma revisão minuciosa de todos os aspectos envolvidos, corroborando os resultados finais e a metodologia de ajuda a decisão utilizada.

Neste estudo são apresentadas sugestões de tecnologias que podem ser aplicadas no processo decisório em questão. Se faz necessário uma atualização dos dados pesquisados de tais tecnologias para as etapas antecedentes a execução final do projeto, como por exemplo: valores de custos atualizados e possibilidade de importação de determinadas tecnologias (modificação nas taxas de cambio); reavaliação do tempo de produção de biogás e da eficiência destes sistemas para o biogás gerado especificamente no aterro sanitário em análise; e interesse atual e local da concessionária no suprimento dos denominados serviços ancilares.

5.3 Interessados (*Stakeholders*)

O estudo de caso principal a ser avaliado pela metodologia de ajuda a decisão desenvolvida nesta tese é a seleção de sistemas de geração de energia elétrica no aterro sanitário Caturrita II localizado na cidade de Santa Maria - RS. A seleção deste aterro tomou como base o interesse da Empresa REVITA, representante deste aterro sanitário na cidade de Santa Maria, em utilizar o biogás do aterro para geração de 1 MW de potência – segundo dados e simulações da própria empresa – considerando ainda uma possibilidade de venda de excedentes de energia elétrica – conexão deste fonte de geração distribuída na rede da concessionária local em determinados períodos do dia. Neste trabalho de doutorado não foram detalhados estudos de conexão desta fonte de geração distribuída na rede de energia da concessionária, considerando que esta conexão como uma possibilidade futura sugerida pela empresa REVITA.

Os principais interessados nesta avaliação são:

- grupo de pesquisadores, denominados especialistas, responsáveis por auxiliar os ADs em quaisquer dúvidas ou tarefas – pertencentes ao Centro de Estudos em Energia e Meio Ambiente da Universidade Federal de Santa Maria (CEEMA/UFSM);
- empresa REVITA do Grupo SOLVI responsável pelo empreendimento (atuando como AD), representada por um engenheiro civil (SOLVI, 2010);
- secretaria do Meio Ambiente de Santa Maria (atuando como AD), representada pelo atual secretário do Meio Ambiente da Prefeitura de Santa Maria – graduado em Engenharia Ambiental;
- concessionária de energia elétrica (atuando como AD), representada por um engenheiro eletricista – considerando a futura possibilidade de venda de energia elétrica produzida no aterro sanitário.

O questionário base aplicado a todos os ADs envolvidos no processo decisório em questão – com intuito de assimilar as preferências destes ADs – está apresentado no Apêndice D.

5.4 Relações das alternativas e critérios

Segundo Matos (2002), não existe em problemas multicritério uma solução ótima que pode ser escolhida sem suscitar controvérsias, mas sim uma solução preferida que pode ser

diferente para diferentes agentes de decisão, sem que se possa dizer que um está certo e os outros errados, pois cada um influenciará na definição de alternativas, critérios e resultados finais, de acordo com os seus interesses e com a sua percepção global da situação. A definição de quais critérios serão avaliados e como estes se relacionam com as alternativas em análise para cada estudo de caso é uma etapa fundamental para a devida ponderação do problema. É interessante recordar que a metodologia de ajuda a decisão desenvolvida nesta tese possibilita ao agente de decisão editar ou incluir novos critérios e criar suas próprias perspectivas, assim como modificar o grau de relevância dos mesmos alterando a posição de classificação na etapa de relevância prévia e inserindo ou retirando meta-regras para a construção do sistema de inferência fuzzy.

Para definição dos critérios foram reunidas as opiniões dos principais envolvidos no processo decisório. No estudo de caso principal – seleção da tecnologia de geração de energia elétrica no aterro sanitário Caturrita II – foram considerados os seguintes critérios:

- faixa de potência: este critério qualitativo está relacionado à capacidade modular e à continuidade no fornecimento de energia elétrica, considerando a utilização de mais de um módulo para o suprimento de energia. Para o aterro sanitário Caturrita II, prevê-se uma geração de 1 MW. Tecnologias que já possuem um único módulo com esta capacidade potência tendem a custos menores, por outro lado qualquer falha nesse módulo compromete todo o fornecimento de energia. O objetivo da avaliação deste critério é aumentar a confiabilidade do sistema (continuidade de geração), exigindo, por parte do sistema de geração (empresa responsável pelo aterro sanitário), a existência de mais de um módulo para o mantimento do fornecimento de energia. É interessante enfatizar ainda que para a análise deste critério o AD deverá ser capaz de lidar com aspectos contraditórios, sendo que tecnologias que necessitam de diversos módulos acarretam em um considerável aumento de custos. Por outro lado um único módulo para geração de energia é uma situação arriscada. Então tecnologias que podem suprir a potência requerida com apenas alguns módulos devem ter preferência, ou seja, as maiores pontuações fornecidas pelos ADs. O critério faixa de potência está ligado ao critério custos – a utilização de diversos módulos para a geração de energia tende a elevar o custo do sistema; e ao critério serviços ancilares – a utilização de mais de um módulo tende a aumentar a confiabilidade de geração, que está diretamente relacionada ao suprimento dos serviços ancilares. Ainda, este critério também pode estar ligado com o critério impactos ambientais, com relação à disposição final dos módulos utilizados após o término da vida útil.

- eficiência aproximada (%): para adaptação na entrada de dados na metodologia desenvolvida, esta variável é normalizada – Equação 4.1. Este critério está diretamente relacionado com as tecnologias em análise, uma vez que o combustível utilizado⁴ (biogás do aterro sanitário Caturrita II) é o mesmo para todos os sistemas em questão. Neste critério, de acordo com as preferências do AD, ainda é possível incluir a avaliação do critério eficiência térmica (cogeração) dependendo obviamente das possibilidades e necessidades do aterro sanitário em análise para uso desta energia. Para o estudo de caso principal (aterro sanitário Caturrita II) não houve, a princípio, a consideração da cogeração. O critério eficiência está ligado ao critério custos – usualmente maiores eficiências significam maiores custos; e ao critério impactos ambientais – um melhor aproveitamento do biogás para a geração elétrica normalmente significa menos emissões de gases poluentes. Deve-se enfatizar ainda que os valores apresentados para este critério são aproximados, pois a eficiência de geração de energia varia consideravelmente com a qualidade do combustível utilizado.

- vida útil aproximada (anos): os valores para este critério são determinados pela relação entre a vida útil do sistema de geração de energia e o tempo estimado de geração de biogás do aterro sanitário avaliado. Tecnologias com vida útil igual ou superior ao tempo de geração do aterro (em anos) possuem grau máximo de intensidade – 1,0; abaixo deste valor, o cálculo se dá por uma regra de três. Assim como no caso do critério eficiência, o critério vida útil se relaciona aos critérios custos e impactos ambientais – maior vida útil significa menor necessidade de reposição do sistema. Na reposição há novos custos e necessidade de disposição final do sistema que não será mais usado e, mesmo com processos de reciclagem e reaproveitamento de peças, sempre há material para ser depositado em aterros especiais (Classe I, por exemplo), aspecto relacionado a impactos ambientais. Deve-se observar que a vida útil das células a combustível é usualmente dada em ciclos, no entanto neste estudo esta unidade foi convertida em anos para a devida avaliação deste critério, igualmente a todas tecnologias analisadas.

- impactos ambientais (IA): este critério qualitativo possui relação com os critérios eficiência, vida útil e custos. O critério IA está principalmente relacionado à redução das emissões de gases poluentes a ser obtida com o aproveitamento energético do biogás (que também possui ligação com o critério eficiência); a quantidade de emissão é um dado que varia significativamente com a quantidade de metano presente no biogás do aterro sanitário

⁴ A comparação de eficiência de alternativas que são alimentadas por diferentes recursos (fontes primárias), como por exemplo aerogeradores, microturbina e PVs, pode ser considerada ineficaz ou sem sentido lógico, pois a forma, disponibilidade e o custos de geração variam completamente para diferentes fontes primárias.

em questão. O critério IA também pode ser relacionado com a necessidade de disposição final de cada tecnologia. Quanto à ligação com o critério custos, supõe-se que menores emissões de gases requerem tecnologias mais avançadas, o que usualmente significa uma adição a custos.

- serviços ancilares (SA): este critério qualitativo considera as particularidades de cada tecnologia juntamente com a necessidade de utilização de interfaces eletrônicas para geração de energia elétrica à rede de distribuição. O critério serviços ancilares também pode possuir uma relação ao critério custos – normalmente, a possibilidade de realização destes serviços implica em maior custo de instalação do sistema de geração. Deve-se ter conhecimento que, no caso do Brasil, embora a ANEEL exija a disponibilidade destes serviços em sistemas geração conectados as redes de energia, tais serviços ainda não possuem quaisquer remunerações, por isso deve haver discussões incisivas entre os agentes de decisão para a consideração da possibilidade de aplicação dos SA com a conexão ao sistema de distribuição de energia elétrica. Deve-se observar que se não houver a venda de excedente de energia elétrica não há razão para incluir este critério no processo decisório.

- custos aproximados de cada tecnologia, em R\$/kW: para adaptação na entrada da metodologia desenvolvida a variável é normalizada – Equação 4.2. Como neste estudo o critério eficiência foi avaliado separadamente, não foi considerado o consumo de m³ de biogás de cada tecnologia – que deve estar relacionado a custos de geração em kWh;. Como já descrito anteriormente, este critério está ligado a todos os demais critérios em análise. Deve-se enfatizar que os valores apresentados para este critério são aproximados, sendo que não foram avaliados sistemas auxiliares, interfaces e sistemas para “purificação” do biogás do aterro que podem ser necessários em determinadas tecnologias.

As tecnologias para geração de energia elétrica em aterros sanitários avaliadas no estudo de caso principal são: turbina a gás (ciclo Brayton), microturbinas, grupo gerador (motor ciclo Otto), grupo gerador (motor ciclo Stirling) e células a combustível (PAFC, MCFC e SOFC). A validação da utilização das mesmas para a geração de energia em aterros sanitários está previamente descrita nas Seções 2.4 e 2.5 – estado da arte e tecnologias para geração de energia em aterros.

5.5 Potencial e período de geração de energia elétrica no aterro sanitário em questão

Com relação as informações básicas sobre o estudo de caso principal – aterro sanitário Caturrita II localizado na cidade de Santa Maria – apresentadas pelo grupo SOLVI (SOLVI, 2010) do qual a empresa REVITA faz parte, a vida útil estimada de geração de biogás neste aterro é de aproximadamente 15 a 20 anos e há possibilidade de instalação de um sistema de geração de energia elétrica de 1 MW de potência. Ainda, poderia ser avaliada a possibilidade de venda de excedentes de energia elétrica produzido em determinados horários do dia. É necessário observar que o aterro sanitário Caturrita II atende os requisitos mínimos de segurança ambiental estabelecidos pelos órgãos fiscalizadores, possuindo assim licença para a geração de energia elétrica.

A simulação do potencial de produção de biogás do aterro sanitário Caturrita II foi realizada através do software BIOGÁS – Figura 5.2. Para o desenvolvimento desta simulação foram utilizadas as seguintes informações:

- população e previsão futura de crescimento da cidade Santa Maria - população inicial de 259.004 habitantes, taxa de crescimento de 1,53% (IBGE, 2010);
- ano de início operacional do aterro em 2006 e tempo de recebimento de resíduos de 6 anos;
- 200.000 toneladas de resíduos estocados e recebimento de RSU de 400 ton/dia (SOLVI, 2010).

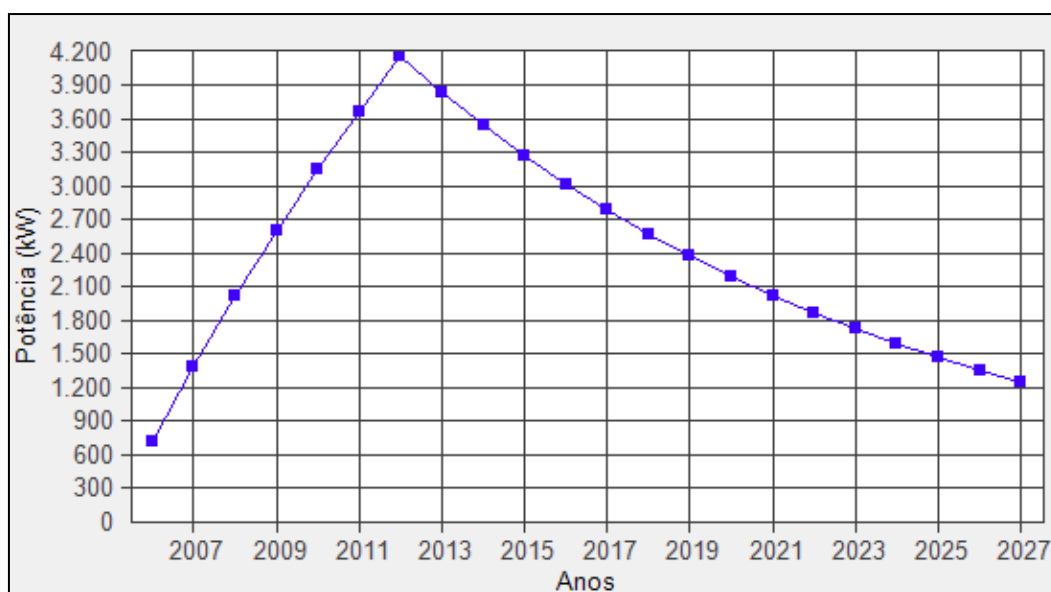


Figura 5.2 Variação do potencial de geração de energia elétrica ao longo dos anos no aterro sanitário Caturrita II (Fonte: Software BIOGÁS).

Através da simulação apresentada na Figura 5.2, pode-se observar que o aterro sanitário Caturrita II teria um potencial de geração de aproximadamente 1 MW entre os anos de 2007 e 2028, corroborando o tempo de geração descrito pelo grupo SOLVI. No entanto, por estarmos no ano de 2012, o tempo de vida útil restante que será considerado para simulação é de 16 anos. Posteriormente são apresentadas simulações otimistas e pessimistas com a variação do tempo de geração do biogás para o estudo de caso em questão.

5.6 Base de dados a ser aplicada na metodologia difusa proposta

Para aplicação prática da metodologia difusa de ajuda a decisão desenvolvida, foram ponderadas análises minuciosas dos principais aspectos envolvidos no processo decisório em questão, apresentados previamente na Figura 5.1. O levantamento da base de dados a ser aplicada na metodologia foi feito pelos especialistas e validados pelos ADs envolvidos. A base de dados utilizada no Estudo de Caso Principal é apresentada na Tabela 5.1, considerando os valores dos critérios quantitativos referenciados em diferentes literaturas (Deublein e Steinhauser, 2008), (Mckenna, 2003), (Moran e Shapiro, 2002), (Korobitsyn, 1999), (Soares, 2007), (Bancor, 2003), (Spokas et al, 2006), (Spiegel et al, 1999), (Trogisch et al, 2005), (Van Herle et al, 2003), (Seitarides, 2008) e as pontuações atribuídas pelos ADs aos critérios qualitativos através do questionário proposto – Apêndice D.

Para normalização dos critérios quantitativos eficiência e custos, foram utilizadas as Equações 4.1 e 4.2. Ao critério vida útil foi considerada a relação entre vida útil do sistema de geração de energia e o tempo estimado de vida de geração de biogás do aterro avaliado; tecnologias com vida útil igual ou superior ao tempo de geração do aterro (em anos) possuem grau máximo de intensidade – 1,0; abaixo deste valor, o cálculo foi feito por uma regra de três. Com as devidas normalizações, é possível verificar na Tabela 5.2 os valores finais que são inseridos ou simulados diretamente na metodologia de ajuda a decisão.

Tabela 5.1 – Base de dados utilizado na metodologia de ajuda a decisão – Estudo de Caso Principal.

| Alternativas | EF | FP | R\$/kW | Vida | SA | IMP |
|--------------|----|------|--------|------|------|------|
| TG | 25 | 0,40 | 2000 | 15 | 0,40 | 0,50 |
| MT | 28 | 1,00 | 2200 | 20 | 0,90 | 0,80 |
| OTTO | 35 | 0,90 | 1200 | 8 | 0,50 | 0,40 |
| STIR | 30 | 0,70 | 3000 | 10 | 0,50 | 0,50 |
| PA | 40 | 0,70 | 6000 | 8 | 0,80 | 0,80 |
| MC | 50 | 0,90 | 5000 | 5 | 0,80 | 0,90 |
| SO | 50 | 0,60 | 6000 | 10 | 0,80 | 0,90 |

Tempo de vida útil do aterro: 16 anos; potência do sistema de geração: 1MW.

Tabela 5.2 - Entrada de dados na metodologia de ajuda a decisão – Estudo de Caso Principal.

| RES | EF | FP | R\$/kW | Vida | SA | IMP |
|------|------|------|--------|------|------|------|
| TG | 0,00 | 0,40 | 0,83 | 0,94 | 0,40 | 0,50 |
| MT | 0,12 | 1,00 | 0,79 | 1,00 | 0,90 | 0,80 |
| OTTO | 0,40 | 0,90 | 1,00 | 0,50 | 0,50 | 0,40 |
| STIR | 0,20 | 0,70 | 0,63 | 0,62 | 0,50 | 0,50 |
| PA | 0,60 | 0,70 | 0,00 | 0,50 | 0,80 | 0,80 |
| MC | 1,00 | 0,90 | 0,21 | 0,31 | 0,80 | 0,90 |
| SO | 1,00 | 0,60 | 0,00 | 0,62 | 0,80 | 0,90 |

Tempo de vida útil do aterro: 16 anos; potência do sistema de geração: 1MW.

As pontuações finais aos critérios qualitativos – SA, FP e IA – foram definidas a partir do consenso alcançado pelos especialistas com cada AD envolvido na análise de um respectivo critério – via aplicação do questionário proposto.

Com relação ao critério Impactos Ambientais, as células a combustível receberam as maiores pontuações, pois liberam uma baixa quantidade de gases poluentes durante a geração de energia elétrica e são construídas de modo relativamente simples com baixa disposição final após o término de sua vida útil. Ainda, nesta análise é considerada a utilização de ácido sulfúrico ou nítrico para a realização da eletrólise, o que permite a contínua utilização do ácido no processo, assim como a liberação de água não contaminada como produto liberado

que volta a solução. A célula do tipo PAFC possui uma pontuação menor em comparação as demais células a combustível - por operar em menor temperatura e possuir emissões um pouco superiores as demais células em questão. A microturbina recebeu uma pontuação elevada, o que é justificado pelo fato desta tecnologia possuir baixos níveis de emissão de gases poluentes e não necessitar de quaisquer tipos de lubrificantes como óleos – que após seu período de utilização podem contaminar o meio ambiente. O motor-gerador Stirling recebeu uma pontuação intermediária, tendo uma emissão de gases não tão elevada como o do motor-gerador OTTO, e possuir a necessidade de trocas periódicas de óleo lubrificante para correto funcionamento do mesmo. A turbina a gás também recebeu pontuações intermediárias, devido principalmente aos níveis de emissão de gases.

Com relação ao critério serviços ancilares (SA), as pontuações estão diretamente relacionadas as tecnologias em questão e as interfaces que são utilizadas nestas tecnologias. Deve-se ter conhecimento que em âmbito nacional não é comum o suprimento de serviços ancilares a nível de distribuição de energia elétrica (considerando a conexão de uma fonte de geração distribuída com potência de 1 MW). Então, para a avaliação deste critério, foram considerados os serviços ancilares supridos na subtransmissão de energia, fazendo uma relação com a possível utilização dos mesmos no âmbito da distribuição de energia elétrica. Em relação a atribuição das pontuações, é possível observar que a Microturbina teve a maior pontuação como SA, considerando que esta tecnologia possui uma interface capaz de fornecer determinados serviços ancilares como controle de frequência e capacidade de auto-restabelecimento ou *Black-start*. Demais serviços ancilares como reserva de prontidão e suporte de potência na ponta – *Peak shaving* – podem ser supridos por qualquer uma das tecnologias em análise. No entanto a aplicação de tais tecnologias de forma modular, ou seja, mais de um módulo para geração de energia, aumenta a confiabilidade de reserva de potência.

Na consideração do critério faixa de potência (FP), visa-se aumentar a confiabilidade do sistema – continuidade no suprimento de energia elétrica – exigindo por parte da geração (empresa responsável pelo aterro) a instalação de mais de um módulo para o mantimento do fornecimento de energia. No entanto, como descrito anteriormente, para o mantimento de tal confiabilidade não é necessário a existência de diversos módulos, sendo que poucos módulos (pouco mais que um, de acordo com as preferências do AD) podem ser suficientes. Em relação a atribuição das pontuações, é possível observar que a Microturbina, a MCFC e o sistema OTTO possuem a maior pontuação, considerando que estas tecnologias possuem módulos com potência em torno de 400 kW, sugerindo a utilização de dois ou três módulos para a geração de 1 MW no aterro em questão. As células PAFC com módulos de até 200 kW

e SOFC com módulos de até 100 kW, assim como o sistema STIRLING com módulos de até 200 kW receberam pontuações intermediárias, seguindo o raciocínio similar ao anterior. A menor pontuação foi atribuída a tecnologia de geração que supre a energia requisitada no aterro através de um único módulo, proposta no sistema TG.

É necessário recordar que neste trabalho de doutorado são apresentadas sugestões de tecnologias que podem ser aplicadas no processo decisório em questão. Se faz necessário uma atualização dos dados pesquisados de tais tecnologias para as etapas antecedentes a execução final do projeto, como por exemplo: custos atualizados e possibilidade de importação de determinadas tecnologias; reavaliação do tempo de produção de biogás e da eficiência destes sistemas para o biogás gerado no aterro em questão; interesse atual e local da concessionária no suprimento dos serviços ancilares.

5.7 Criação das perspectivas - etapa de relevância previa

A criação da etapa de relevância previa realizada pelos ADs através do questionário proposto – Apêndice D, resultando nas seguintes perspectivas:

- perspectiva REVITA: 1º custos, 2º eficiência, 3º vida útil, 4º faixa de potência, 5º impactos ambientais, 6º serviços ancilares.
- perspectiva CONCESSIONÁRIA: 1º faixa de potência, 2º serviços ancilares, 3º impactos ambientais, 4º vida útil, 5º eficiência, 6º custos de instalação.
- perspectiva SEC. MEIO AMBIENTE: 1º impactos ambientais, 2º vida útil, 3º eficiência, 4º faixa de potência, 5º serviços ancilares, 6º custos.
- perspectiva REVITA/CONCESSIONÁRIA: 1º custos, 2º faixa de potência, 3º eficiência, 4º serviços ancilares, 5º vida útil, 6º impactos ambientais.

5.8 Análise dos Resultados Finais

A classificação final proveniente das simulações – modelagem 1 – realizadas com a metodologia de ajuda a decisão desenvolvida para seleção das fontes renováveis de energia a serem utilizadas no aproveitamento energético do aterro sanitário em questão, está apresentada nas Tabelas 5.3 e 5.4, considerando as perspectivas REVITA, CONCESSIONÁRIA, SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE e REVITA/CONCESSIONÁRIA.

Tabela 5.3 – Classificação final pela modelagem difusa - perspectivas da REVITA e da CONCESSIONÁRIA

| Fontes | PRF - REVITA | CL | PRF - Conces | CL |
|--------|--------------|----|--------------|----|
| TG | 0,500 | 4° | 0,500 | 3° |
| MT | 0,750 | 1° | 0,757 | 1° |
| OTTO | 0,645 | 2° | 0,500 | 3° |
| STIR | 0,500 | 4° | 0,500 | 3° |
| PAFC | 0,567 | 3° | 0,605 | 2° |
| MCFC | 0,645 | 2° | 0,757 | 1° |
| SOFC | 0,500 | 4° | 0,757 | 1° |

Tabela 5.4 – Classificação final pela modelagem difusa - perspectivas da SEC. MEIO AMBIENTE e perspectiva conjunta REVITA e CONCESSIONÁRIA DE ENERGIA.

| Fontes | PRF – SEC. MA | CL | PRF – REV/CONC | CL |
|--------|------------------|----|-------------------|----|
| TG | 0,423 | 6° | 0,395 | 6° |
| MT | 0,750 | 1° | 0,750 | 1° |
| OTTO | 0,500 | 4° | 0,645 | 2° |
| STIR | 0,428 | 5° | 0,428 | 5° |
| PAFC | 0,605 | 3° | 0,567 | 3° |
| MCFC | 0,750 | 1° | 0,645 | 2° |
| SOFC | 0,639 | 2° | 0,500 | 4° |

Observando os resultados da Tabela 5.4, percebe-se que independente da perspectiva a Microturbina foi selecionada como a melhor tecnologia para geração de energia elétrica no aterro em questão. Ainda sobre este resultado, verifica-se que para a perspectiva REVITA, onde o critério eficiência é o segundo de maior prioridade, a MT manteve-se em primeiro lugar no ranking, mesmo com o segundo menor valor de eficiência dentre as tecnologias em análise. Este resultado pode ser justificado observando as Tabelas 5.1 e 5.2, onde a MT mantém elevados índices para os demais critérios analisados. A célula a combustível MCFC se destacou junto com a MT selecionada como primeira opção nas perspectivas CONCESSIONÁRIA e SEC. DO MEIO AMBIENTE, e segunda opção nas perspectivas REVITA e REVITA/CONCESSIONÁRIA. Pode-se verificar que a MCFC não foi selecionada como a melhor opção nas perspectivas onde o critério custos possuía maior relevância, fato justificável pelo alto custo desta célula. Esta mesma justificativa – alto custo – pode ser aplicada as colocações da célula SOFC. Outro resultado interessante está relacionado a tecnologia de menor custo, largamente aplicada para geração de energia elétrica a aterros

sanitários. Esta tecnologia – sistema OTTO – foi selecionada como segunda melhor opção apenas nas perspectivas relacionadas a empresa REVITA, onde o critério custos possui maior prioridade. Sobre as piores colocações, o sistema STIRLING foi selecionado como último do ranking para todas as perspectivas em questão. Avaliando os dados das Tabelas 5.1 e 5.2 é possível notar que esta tecnologia possui um baixo índice de eficiência e que os demais critérios também possuem valores intermediários, não “adicionando valores” para a avaliação multicriterial da alternativa.

Analisando a seleção de mais de uma tecnologia como melhor opção, por exemplo para a perspectiva CONCESSIONÁRIA – tecnologias MT, MCFC e SOFC – é possível verificar que o critério custos, que desqualifica as células a combustível, é o menos prioritário na perspectiva em questão. Ainda, os critérios serviços auxiliares e impactos ambientais possuem valores bem elevados para as três alternativas selecionadas. Caso o agente de decisão fosse obrigado a selecionar apenas uma destas tecnologias, poderiam ser avaliadas alterações nas modelagens – como no caso das modelagens 2 e 3 apresentadas detalhadamente no Apêndice A – ou optar pela tecnologia que possui um maior valor no critério mais prioritário da perspectiva em questão.

5.9 Comparação dos resultados entre as três modelagens desenvolvidas com a metodologia de ajuda a decisão difusa proposta

O objetivo desta seção é apresentar as alterações na seleção da tecnologia mais apropriada de geração de energia elétrica no aterro em questão, mediante as simulações em três diferentes modelagens. Deve-se ter conhecimento que as perspectivas criadas seguem a mesma relevância para as modelagens 1 e 2, sendo que para a modelagem 3 não há quaisquer prioridades entre os critérios – ver Apêndice A. A base teórica do desenvolvimento destas modelagens está apresentada em detalhes no Apêndice A. Utilizando então a modelagem 3 como base para algumas comparações entre os resultados finais, podemos chegar as seguintes observações:

- perspectiva REVITA: sistema OTTO como melhor opção na modelagem 3 e modelagem 2 (nesta última, devido a consequência de corte relacionada ao critério custos – ver Apêndice A). Para a modelagem 1, adotada como principal, a MT foi selecionada como melhor opção apresentando uma avaliação global dos critérios de acordo com as preferências dos ADs, observando que um único valor reduzido dentre os critérios importantes – nesta

perspectiva o critério eficiência (segundo de maior importância) – não prejudicou a seleção da MT. Deve-se enfatizar que caso houvesse uma meta-regra com consequência de corte para o segundo critério de maior importância, esta tecnologia não seria selecionada.

- perspectiva CONCESSIONÁRIA: a tecnologia MT como melhor opção nas três diferentes modelagens. Embora tenham sido apresentadas mais de uma tecnologia na primeira posição (empates de valores), para a modelagem 1, percebe-se uma unanimidade na seleção da MT.

- perspectiva SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE: a célula MCFC como melhor opção nas três diferentes modelagens. Embora tenham sido apresentados alguns empates de valores nas primeiras posições – modelagens 1 e 2 – há uma unanimidade na seleção da MCFC, recordando que um único valor reduzido dentre os critérios importantes (no critério vida para esta perspectiva) não prejudicou a seleção da MCFC.

- perspectiva REVITA/CONCESSIONÁRIA: a MT e o sistema OTTO ocupando as duas primeiras posições para as três diferentes modelagens. O resultado é similar a perspectiva REVITA - OTTO como melhor opção nas modelagens 3 e 2 (nesta última, devido a consequência de corte relacionada ao critério custos). Para a modelagem 1, a MT foi selecionada como melhor opção apresentando uma avaliação global. Para a modelagem 3 a MCFC foi uma das melhores alternativas, pois nesta modelagem não há qualquer relevância entre os quatro critérios avaliados, e como já descrito um único valor reduzido dentre os critérios importantes não prejudica a seleção da tecnologia.

Para finalizar as comparações entre as modelagens, as diferentes perspectivas foram avaliadas considerando um cenário otimista de geração de biogás – durante 20 anos – e um cenário pessimista de geração de biogás – durante apenas 10 anos. Nestas simulações houve uma modificação nos dados de entrada do critério vida útil. O critério custos não sofreu quaisquer alterações, pois neste estudo não foram considerados valores de custos operacionais e de manutenção, assim como necessidade de reposição de peças ou troca completa de todo sistema de geração – ao término de sua vida útil. Com os novos dados de entrada ao critério vida útil, foram observadas as seguintes modificações:

- Para modelagem 1 a alteração mais significativa foi verificada na perspectiva SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE, onde a célula SOFC foi selecionada como a melhor opção para o cenário otimista – no cenário inicial com 16 anos de geração a célula MCFC havia sido eleita como melhor opção. Nas demais perspectivas não foram constatadas modificações relevantes.

- Para modelagem 2 não foram constatadas quaisquer modificações relevantes, considerando a extrema importância dada ao critério mais importante pela meta-regra com consequência de corte, sendo que em nenhuma das perspectivas o critério vida útil é o critério de maior relevância.

- Para modelagem 3 a alteração mais significativa foi verificada na perspectiva CONCESSIONÁRIA, onde a célula SOFC foi selecionada como a melhor opção para o cenário otimista junto a MT - que já havia sido eleita como melhor opção no cenário inicial. Na perspectiva REVITA, a célula PAFC foi selecionada como a segunda melhor opção para o cenário otimista. Nas demais perspectivas não foram constatadas modificações relevantes.

5.10 Considerações Finais do Capítulo 5

O Capítulo 5 apresentou os aspectos relacionados ao Estudo de Caso Principal – aterro sanitário Caturrita II localizado na cidade de Santa Maria – onde foi verificada a aplicabilidade da nova metodologia de ajuda desenvolvida para a seleção de uma fonte de geração de energia elétrica de pequeno porte alimentada por biogás do tratamento de resíduos sólidos urbanos.

No caso avaliado, a Microturbina foi selecionada como a melhor tecnologia para geração de energia elétrica no aterro em questão – tomando como base a Modelagem 1. Com as simulações das demais modelagens foi possível visualizar quais seriam as outras alternativas promissoras a melhor seleção. Além disso, através de modificações no tempo de geração de biogás, puderam ser avaliados novos cenários - otimista e pessimista - propondo assim diferentes tecnologias para geração de energia no aterro em questão.

É necessário observar ainda, que após a obtenção dos resultados finais foi realizada uma validação heurística – preferências globais heurísticas – avaliando os resultados finais, considerando principalmente a contribuição dos critérios de maior relevância (preferências iniciais) com a seleção da melhor alternativa.

6 CONCLUSÕES

Para o crescimento do aproveitamento energético de RSU, projetos de P&D com estudos de viabilidade econômico-ambiental do RSU para a geração de energia elétrica devem ser constantemente desenvolvidos proporcionando aos agentes de decisão as devidas ferramentas e informações para seleção das possíveis tecnologias para gerenciamento e aproveitamento dos resíduos sólidos.

Com intuito de viabilizar a geração de energia elétrica e térmica a partir de resíduos sólidos urbanos, deve-se tomar como base métodos multicriteriais, considerando a existência de uma série de critérios para atender necessidades e interesses diversos quando se deseja selecionar tecnologias de geração e armazenamento de energia. A partir de tomadas de decisão multicriteriais, como resposta final é possível obter uma solução mais satisfatória que tende a incorporar com clareza as preferências dos agentes de decisão, em prol de uma análise mais global de cada processo decisório. Estes aspectos foram observados na aplicação da metodologia de apoio a decisão no estudo de caso principal, onde a seleção da alternativa mais apropriada se baseou nas preferências dos ADs envolvidos e na análise conjunta dos diversos critérios relacionados com a realidade local – seleção de um sistema de geração de energia elétrica em um aterro com capacidade de 1 MW durante 16 anos.

No desenvolvimento da metodologia de ajuda a decisão, a aplicação de relevância prévia aos critérios em análise, a criação e seleção de meta-regras e o formato de construção e avaliação de tais regras em “escada”, foram contribuições significativas apresentadas nesta tese.

É importante destacar as seguintes caracterizações da metodologia de apoio a decisão desenvolvida:

- avaliação: possibilidade de um elemento pertencer a mais de um conjunto, e em graus diversos, diferentemente dos conjuntos tradicionais. A pertinência de um elemento numa variável fuzzy não é uma questão de afirmação ou negação, mas uma questão de grau;
- construção: facilidade de criação de meta-regras e verificação do formato de construtivo das regras em “escada” – onde é possível visualizar e validar as modelagens desenvolvidas;

- interação: assimilação das preferências dos agentes de decisão, sendo estas atribuídas de diversas formas – inserção ou remoção de critérios a serem avaliados, alteração da posição dos critérios na etapa de relevância (criação de diversas perspectivas), e desenvolvimento e seleção de meta-regras;

- aplicação: possibilidade de utilização da metodologia de ajuda a decisão para seleção de sistemas de geração de energia elétrica em aterros sanitários de pequeno e grande porte;

- corroboração: os aperfeiçoamentos desenvolvidos permitiram a construção e averiguação das modelagens construídas – eliminando inconsistências e quaisquer assimetrias indesejadas – facilitando o entendimento do agente de decisão para a análise do problema e propiciando uma maior participação do mesmo para obtenção de um resultado mais satisfatório. Com a verificação dos resultados finais, caso estes não sejam satisfatórios, há possibilidade de alterar o modo de desenvolvimento da etapa de interação e simular os dados novamente, até satisfação dos ADs. Por outro lado, a partir da análise de resultados finais que, a priori, não seriam satisfatórios, pode-se comprovar que a idéia inicial dos ADs, de qual seria a melhor alternativa de acordo com suas preferências iniciais, estaria equivocada gerando assim novos pontos de vista e discussões sobre o processo decisório

Por fim, pode-se concluir que metodologia de ajuda a decisão desenvolvida é uma metodologia genérica podendo ser aplicada na avaliação de quaisquer sistemas de geração e armazenamento de energia elétrica, desde que todos os aspectos envolvidos no processo decisório sejam devidamente incorporados no problema em questão.

7 PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Aperfeiçoamento do critério custos, considerando custos operacionais e de manutenção, custo de investimento, custo da eletricidade gerada, taxa de retorno e potência gerada relacionada ao estudo de caso em análise (biogás gerado no aterro). Neste caso poderia ser utilizado o software HOMER ou o software RETSCREEN para obtenção de um resultado satisfatório que envolva uma análise conjunta destes fatores. Esta etapa não teria qualquer influência direta na metodologia de ajuda a decisão desenvolvida, apenas iria alterar os dados de entrada ao critério custos, proporcionando resultados mais próximos a realidade considerando a entrada de dados mais precisos.

Desenvolvimento de uma ferramenta computacional interativa e de fácil manuseio baseada na metodologia proposta e que pudesse ser aplicada em diversos estudos de caso que envolvam armazenamento e geração de energia. Neste software o usuário, possivelmente um agente de decisão, poderia incluir diretamente novas meta-regras, modificando etapa de relevância, sem requerer a ajuda de um especialista. No entanto, deve-se ter cuidado com este alto grau de liberdade de interferência do AD, sendo que o auxílio de um especialista deve ser sempre levado em conta para que não sejam cometidos equívocos que resultem em condições de não consistência ou assimetrias sem justificações.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFGAN, N.H., CARVALHO M.G. Multi-criteria assessment of new and renewable energy power plants. **Energy**, v. 27, p.739–755, 2002.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. Atlas de Energia Elétrica - 3ª Edição / 2008. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/Atlas/download.htm>. Acesso em: Abril de 2010.

AKASH, B. A., MAMLOOK, R., MOHSEN M.S. Multi-criteria selection of electric power plants using analytical hierarchy process. **Electric Power Systems Research**, v. 52, p. 29–35, 1999.

AMAGAI, H, LEUNG, P. Multiple criteria analysis for Japan's electric power generation mix. **Energy Systems and Policy**, v. 13, p. 219–36, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. Amostragem de resíduos - Procedimentos, NBR 10007, Brasil, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. Apresentação de projetos de Aterros Sanitários de resíduos sólidos urbanos - Procedimentos, NBR 8419, Brasil, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação, NBR 13896, Brasil, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 10.004. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE DEFESA AO AMBIENTE - AMDA, 2010. Disponível em: <http://www.amda.org.br/detalhe/2,37,1784,aterro-sanitario-sera-transformado-em-usina-de-energia-em-bh.aspx>. Acesso em: Fevereiro de 2011.

ALVES, J. W., CARDOSO FILHO, E. Biogás – aproveitamento energético aterros sanitários. In: CETESB/PROCLIMA, 2009, São Paulo. **Anais...** São Paulo: CETESB, 2009.

AUMONIER, S. The greenhouse gas consequences of waste management - identifying preferred options. **Energy Conversion and Management**, v. 37, n° 6, p.1117-1122, 1996.

BANA E COSTA, A., VANSNICK, J. A critical analysis of the eigenvalue method used to derive priorities in AHP. **European Journal of Operational Research**, v. 187, n° 3, p. 1422-1428, 2008.

BANA E COSTA, C., J. C. VANSNICK (1994), “MACBETH - An Interactive Path Towards the Construction of Cardinal Value Functions”, **International Transactions in Operational Research**, v. 1, n° 4, p. 489-500. 1994.

BANCOR, Contribuição para a proposição do biogás dentro da tecnologia biomassa ao PROINFA. In: Bancor Internacional, São Paulo, 2003. **Anais eletrônicos...** São Paulo: Consultoria e Implementação do Meio Ambiente, 2003, p.1-16. Disponível em: <http://www.bancor.com.br/index/Eletobras-Proinfa-Projeto%20.pdf>. Acesso em: Abril de 2010.

BARIN, A. **Metodologia para Análise dos Efeitos da Geração Distribuída sobre as Características Operacionais dos Sistemas de Distribuição de Energia Utilizando Técnicas Multicriteriais**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Maria, 2007.

BARIN, A., CANHA, L. N., MAGNAGO, K. F., ABAIDE, A. R. Gerenciamento de Fontes Alternativas de Geração Distribuída utilizando uma Análise Multicriterial baseada no Método AHP e na Lógica Fuzzy. In: Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2009, Recife. **Anais...** Recife: SNPTEE, 2009.

BARIN, A., CANHA, L. N., MAGNAGO, K. F., ABAIDE, A. R. Renewable Hybrid Systems using Biogas Fuzzy Multi-Sets and Fuzzy Multi-Rules. In: Energy Conversion Congress and Exposition, 2009, San José – California. **Anais...** San José: ECCE, 2009.

BARIN, A., CANHA, L. N., MAGNAGO, K. F., ABAIDE, A. R., MACHADO, R. Q. Storage Energy Management with Power Quality Concerns - The Analytic Hierarchy Process and The Fuzzy Logic. In: 10th Brazilian Power Electronics Conference –, Bonito, MS, 2009. **Anais...** Bonito: COBEP, 2009.

BARIN, A., CANHA, L. N., MAGNAGO, K. F., ABAIDE, A. R., MACHADO, R. Q. Análise Multicritério de Fontes Renováveis de Energia com Biogás – Conjuntos e Regras Fuzzy. In: Eighth Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission, Ubatuba, SP, 2009. **Anais...** Ubatuba: CLAGTEE, 2009.

BARIN, A., CANHA, L. N., MAGNAGO, K. F., ABAIDE, A. R., WOTTRICH, B. Multicriteria Decision Making for Management of Storage Energy Technologies on Renewable Hybrid Systems - The Analytic Hierarchy Process and The Fuzzy Logic. In: 6th International Conference on the European Energy Market, Leuven, Bélgica, 2009. **Anais...** Leuven: EEM09, 2009.

BARIN, A., CANHA, L. N., MAGNAGO, K. F., ABAIDE, A. R., WOTTRICH, B. Multicriteria Analysis of the Operation of Renewable Energy Sources taking as basis the AHP Method and Fuzzy Logic concerning Distributed Generation Systems. In: World Congress on Electronics & Electrical Engineering, Cairo, Egypt, 2009. **Anais...** Cairo: WCEEENG09, 2009.

BARIN, A., CANHA, L. N., MARTINS, L. F. ABAIDE, A. R. Análise crítica dos atuais incentivos ao uso de fontes renováveis de energia no cenário energético brasileiro – o caso do biogás. In: II Fórum Brasileiro de Energia, Brasil, Bento Gonçalves, 2010. **Anais...** Fórum Brasileiro de Energia, 2010.

BARROS, L. C., BASSANEZI, R. C. **Tópicos de lógica fuzzy e biomatemática**. Unicamp-Imecc, 2006.

BECCALI, M., CELLURA, M., MISTRETTA, M. Decision-making in energy planning-application of the ELECTRE method at regional level for the diffusion of renewable energy technology. **Renewable Energy**, v. 28, n°13, p. 2063–87. 2003.

BELOHLAVEK, R., KLIR, G. J., LEWIS III, H. W., WAY, E. C. Concepts and fuzzy sets: Misunderstandings, misconceptions, and oversights. **International Journal of Approximate Reasoning** v. 51, p.23 – 34. 2009.

BELTON, V., STEWART, J. **Multiple criteria decision analysis: an integrated approach**. Springer, 2002. 372 p.

BERNAL-AGUSTIN, J. L., DUFO-LÓPEZ, R. Economical and environmental analysis of grid connected photovoltaic systems in Spain. **Renewable Energy**, v. 31, p.1107 –1128. 2006.

Biomassa Brasil, Banco de dados. Disponível em: <http://infoener.iee.usp.br/cenbio/biomassa.htm>. Acesso em: Abril de 2010.

BLAIR, P. D. **Multiobjective regional energy planning: application to the energy park concept**. Martinus Nijhoff, 1979. 163 p.

BOAS, C. L. T. Métodos Multicritérios de Análise de Decisão (MMAD) para decisões relacionadas ao uso múltiplo de reservatórios: The Analytic Hierarchy Process. Gestão Econômica do Meio Ambiente. UnB/FACH. Goiânia. **Anais eletrônicos...** Goiânia: UnB/FACH, 2006. Disponível em: [http://www.cprm.gov.br/rehi/simposio/go/METODO%20MULTICRITERIOS%20DE%20ANALISE%20DE%20DECISAO%20\(MMAD\)%20PARA%20AS%20DECISoes%20RELACIONADAS%20AO%20USO%20MULTIPLo%20.pdf](http://www.cprm.gov.br/rehi/simposio/go/METODO%20MULTICRITERIOS%20DE%20ANALISE%20DE%20DECISAO%20(MMAD)%20PARA%20AS%20DECISoes%20RELACIONADAS%20AO%20USO%20MULTIPLo%20.pdf). Acesso em: Abril de 2010.

BORGES, A.R., ANTUNES, C.H. A fuzzy multiple objective decision support model for energy-economy planning. **European Journal of Operational Research**, v. 145, p. 304–16. 2003.

BOVE, R., LUNGHI, P. Electric power generation from landfill gas using traditional and innovative technologies. **Energy Conversion and Management**, v. 47, p. 1391–1401, 2006.

BRANS, J.P., VINCKE, P., MARESCHAL, B. How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method. **European Journal of Operational Research**, v. 24, p. 228–238, 1986.

BRASIL. Lei Federal nº. 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.. Poder Executivo, Brasília, DF, 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>. Acesso em: 31 de Agosto de 2010.

CAIXETA, D. M. **Geração de Energia Elétrica a partir da Incineração de Lixo Urbano: O Caso de Campo Grande/MS**. Monografia de Especialização. Universidade de Brasília, 2005.

CHATZIMOURATIDIS A. I., PILAVACHI P. A. Technological, economic and sustainability evaluation of power plants using the Analytic Hierarchy Process. **Energy Policy**, v. 37, p.778–87, 2009.

CHEN, Z. Using meta-rules for fuzzy inference control. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 79, p. 163–173, 1996.

CLIVILLE, V., BERRAH, L., MAURIS, G. Quantitative expression and aggregation of performance measurements based on the MACBETH multi-criteria method. **International Journal of Production Economics**, v. 105, n° 1, p.171–189, 2007.

COBAS, V. R. M. **Análise de sistemas híbridos com células a combustível de oxido sólido e Microturbinas a gás**. Tese de doutorado, Universidade Federal de Itajubá, 2006.

COELHO, S. T., SILVA, O. C., VARKULYA, A. JR., AVELLAR, L. H. N., FERLING, F. F. Estado da arte do biogás. Relatório de acompanhamento. In: Centro Nacional de Referência em Biomassa. São Paulo, 2001. **Anais...** São Paulo: CENBIO, 2001.

COELHO, S. T., VELÁZQUEZ, S. M. S. G., MARTINS, O.S., ABREU, F.C. **A conversão da fonte renovável biogás em energia**. Políticas públicas para a Energia: Desafios para o próximo quadriênio. Brasília, 2006. **Anais eletrônicos...** Brasília: CENBIO, 2006, p. 1-11. Disponível em: http://cenbio.iee.usp.br/download/projetos/8_energ-biog.pdf. Acesso em: Abril de 2010.

COIMBRA, L. **Programa Nacional de Geração de Energia Elétrica a partir do Lixo (Progel) e outras providências**. Projeto de Lei, 2008.

CORMIO C., DICORATO M., MINOIA A., TROVATO M. A regional energy planning methodology including renewable energy sources and environmental constraints. **Renewable and Sustainable Energy**, v. 7, n° 2, p. 99 –130, 2003.

CORRIA, M. E., COBAS V. M., LORA, E. S. Perspectives of Stirling engines use for distributed generation in Brazil. **Energy Policy**, v. 34, p. 3402–3408, 2005.

COX, E. **The Fuzzy Systems Handbook: a practitioner's guide to building, using, and maintaining fuzzy systems**. Londres: Academic, 1999. 176 p.

CVANSNICK, J.C. Uma nova abordagem ao problema de construção de uma função de valor cardinal: MACBETH. **Investigação Operacional**, v. 15, p. 15-35, 1995.

DAVID HU, S. **Cogeneration**. Reston Pub. Co, 1985. Digitalizado pela Universidade de Michigan, p. 428, 2007.

DAVIS, R. Meta-Rules - Reasoning about Control. **Artificial Intelligence**, v. 15, n° 3, p. 179-222, 1980.

DEUBLEIN, D., STEINHAUSER, A. **Biogas from waste and renewable resources: an introduction**. Wiley-VCH, 2008. 443 p.

DIAKOULAKIA, D., GEORGIOUA, P., TOURKOLIASA, C., GEORGOPOULOU, E., LALASB, D., MIRASGEDISB, S., SARAFIDISB, Y. A multicriteria approach to identify investment opportunities for the exploitation of the clean development mechanism. **Energy Policy**, v. 35, p.1088–1099, 2007.

DODGSON, J., SPACKMAN, M., PEARMAN, A., PHILLIPS, L. **DTLR multi-criteria analysis manual**. **DTLR – Department for Transport, Local Government and the Regions**. Reino Unido. 2001. Disponível em: http://www.odpm.gov.uk/stellent/groups/odpm_about/documents/pdf/odpm_about_pdf_608524.pdf. Acesso em: Abril de 2010.

DRIANKOV, D., HELLENDORRN, H., REINFRANK, M. **An introduction to fuzzy control**. Springer, 1996. 316 p.

DUARTE, A. C. **Projetos de MDL em Aterros Sanitários no Brasil: Alternativa para o Desenvolvimento Sustentável**. Dissertação de Mestrado. Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, 2006.

DUCOM, G., RADU-TIRNOVEANU, D., PASCUAL, C. BENADDA, B. PATRICK, G. Biogas – Municipal solid waste incinerator bottom ash interactions: Sulphur compounds removal. **Journal of Hazardous Materials**, v.166, pp. 1102-1108, 2009.

DUGAN, R. C., MCDERMOTT, T.E. Operating conflicts for distributed generation on distribution systems. In: Rural Electric Power Conference, Little Rock, EUA, 2001. **Anais...** Little Rock: IEEE Rural Electric Power Conference, 2001, p. 1-6.

DUGAN, R. C., PRICE, S.K. Including Distributed Resources in Distribution Planning. In: Power Systems Conference and Exposition, 3, 2004, Knoxville. **Anais...** Knoxville: PES IEE, 2004, p. 1694-1698.

DUTRA, R. M., SZKLO, A. S. Incentive policies for promoting wind power production in Brazil: Scenarios for the Alternative Energy Sources Incentive Program [PROINFA] under the New Brazilian electric power sector regulation. **Renewable Energy**, v. 33, p. 65–76. 2008.

EDINGER, R., SANJAY, K. **Renewable Resources for Electric Power**. Quorum Books, 2000.

EKEL, P., POPOV, V. **Fuzzy set theory and problems of the design and control of power systems and subsystems**. In: 4th IEEE Conference on Control Applications. pp. 46-51. Albany, USA. 1995. **Anais...** Albany: USA. 1995.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Methane. Disponível em: <http://www.epa.gov/methane>. Acesso em: Maio de 2009.

ENGESERT Engenharia e Projetos, 2010. Disponível em: <http://www.engesert.com.br/br/noticia/uberlandia-tem-projeto-de-aproveitamento-de-gas-de-aterro.html>. Acesso em: Fevereiro de 2011.

ESCOSTEGUY, P. A. V. **Gerenciamento de Resíduos Sólidos e seus Impactos Ambientais: uma Visão do Contexto Atual**. Universidade de Passo Fundo, 2003.

FARRET, F. A., SIMOES, M. G. **Integration of Alternative Sources of Energy**. John Wiley & Sons, 2006.

FARRET, F. A. **Aproveitamento de pequenas fontes de energia elétrica**, 2. ed. Editora UFSM, 2010.

FIGUEIREDO, N. J. V. **Utilização do Biogás de Aterro Sanitário para Geração de Energia Elétrica e Iluminação a Gás – Estudo de Caso**. Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2007.

FIORUCCI P., MINCIARDI R. Solid waste management in urban areas: Development and application of a decision support system. **Resources Conservation and Recycling**, v. 37, n° 4, p. 301–328, 2003.

GALVÃO, L. C. R., SAIDEL, M. A., RIBEIRO, F. S., UDAETA, M. E. M. **Energia de resíduos sólidos como Mecanismo de Desenvolvimento Limpo**. In: 4° Encontro de Energia no Meio Rural, São Paulo, 2003. **Anais...** São Paulo: GEPEA – USP, 2003. Disponível em: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022002000100062&script=sci_arttext. Acesso em: Abril de 2010.

GANDIBLEUX, X. Interactive multicriteria procedure exploiting a knowledge-based module to select electricity production alternatives: The CASTART system. **European Journal of Operational Research**, v. 113, n° 2, p. 355–73, 1999.

GEGOV, A., GOBALAKRISHNAN, N. Advanced Inference in Fuzzy Systems by Rule Base Compression, **Mathware & Soft Computing**, v. 14 , n° 7, p. 201-216, 2007.

GOLABI, K., KIRKWOOD, C. W., SICHERMAN, A. Selecting a portfolio of solar energy projects using multiattribute preference theory. **Management Science**, v. 22, n° 2, p. 174–89, 1981.

GOMES, L. F. M., MOREIRA, A. M. M. Da informação à tomada de decisão: agregando valor através dos métodos multicritério. **Revista de Ciência e Tecnologia**, v. 2, n° 2, p. 117 - 139. 1998.

GUGLIELMETTI, F. R., MARINS, F. A. S., SALOMON, V. A. P. Comparação teórica entre métodos de auxílio à tomada de decisão por múltiplos critérios. In: XXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Ouro Preto. 2003. **Anais...** Ouro Preto: ENEGEP, 2003, p 1-6. Disponível em: http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2003_TR0602_0237.pdf. Acesso em: Abril de 2010.

HAMAM, A., GEORGANAS N. D. A Comparison of Mamdani and Sugeno Fuzzy Inference Systems for Evaluating the Quality of Experience of Hapto-Audio-Visual Applications. In: IEEE International Workshop on Haptic Audio Visual Environments and their Applications, Canada. 2008. **Anais...** Canada: IEEE, 2008.

HARALAMBOPOULOS D.A., POLATIDIS H. Renewable energy projects: structuring a multi-criteria group decision making framework. **Renewable Energy**, v. 28, n° 6, p. 961–73, 2003.

HENRIQUES, R. M. **Aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos: uma abordagem tecnológica**. Niterói: Universidade Federal Fluminense, 2004 (Dissertação em Ciências em Planejamento Energético).

HINRICHS, R. A., KLEINBACH, M. **Energia e Meio Ambiente**, 3. ed. Cengage Learning, 2009.

HISANO, A. **Fuzzy inference system having dominant rule detection unit**. Patent: OMRON TATEISI ELCTRONICS, 1993.

HOFFMANN, R., SILVA, J. C. **O uso do ciclo Stirling no aproveitamento de fontes térmicas**. Universidade Federal de Santa Maria, 2002.

HOKKANEN J, SALMINEN P. Choosing a solid waste management system using multicriteria decision analysis. **European Journal of Operational Research**, v. 98, p. 19–36, 1997.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, IBGE – Censo 2010. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/resultados_dou/RS2010.pdf. Acesso: Janeiro de 2012.

JUCÁ, J. F. T. Bioenergia em Aterros Sanitários: caracterização e monitoramento de resíduos sólidos urbanos. In: Ecos Sardenha, São Paulo, 2010. **Anais eletrônicos...** Pernambuco: UFPE-GRS, 2010.

KABLAN, M. M. Decision support for energy conservation promotion: an analytic hierarchy process approach. **Energy Policy**, v. 32, n° 10, p. 1151–8, 2004.

KAHRAMAN, C., KAYA, I., CEBI, S. A comparative analysis for multiattribute selection among renewable energy alternatives using fuzzy axiomatic design and fuzzy analytic hierarchy process. **Energy**, v. 34, n°10, p. 1603-1616, 2009.

KAVRAKOGLU I. Multi-objective strategies in power system planning. **European Journal of Operations Research**, v.12, p.159–70, 1983.

KEENEY, R. L. Common Mistakes in Making Value Trade-Offs. **Operations Research**, v. 50, n°6, p. 935-945, 2001.

KEENEY, R. L. **Value-Focused Thinking: A Path to Creative Decision making**, 3. ed. Harvard University Press, 1998. 416 p.

KEENEY, R. L., RAIFFA, H. **Decisions with multiple objectives: preferences and value trade-offs**. Wiley: New York, 1976.

KEENEY, R. L., RAIFFA, H. **Decisions with multiple objectives: preferences and value trade-offs**. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 569 p.

KHALILI, Amyra El. O que são Créditos de Carbono?. **Revista Eco 21**, ano XII, n° 74, 2003. Disponível em: <http://www.ambientebrasil.com.br/composer.php3?base=./noticias/index.php3&conteudo=./noticias/amyra/creditos.html>. Acesso: Maio de 2009.

KISZKA, J.B., KOCHANSKA, M. E., SLIWINSKA, D. S. The influence of some fuzzy implications operators on the accuracy of fuzzy model. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 15, p. 111-128, 1985.

KLIR, G. J., YUAN, Bo. **Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications**. Londres: Prentice Hall P. T. R, 2003. 592 p.

KÖKSALAN, M., PLANTE, R. D. Interactive Multi-Criteria Optimization for Multiple Response Product and Process Design. **Manufacturing and Service Operations Management**, v. 5, p. 334-347, 2003.

- KOROBITSYN, M. A., JELLEMA, P., HIRS, G. G. Possibilities for gas turbine and waste incinerator integration. **Energy**, v. 24, n° 9, p. 783-793, 1999.
- LANDIM, A. L. P. F., AZEVEDO, L. P. O Aproveitamento Energético do Biogás em Aterros Sanitários: Unindo o Inútil ao Sustentável. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, v. 27, p. 59-100. 2008.
- LANTZ, M., SVENSSON, M., BJÖRNSSON, L., BÖRJESSON, P. The prospects for an expansion of biogas systems in Sweden - Incentives, barriers and potentials. **Energy Policy**, v. 35, n° 3, p. 1830-1843, 2007.
- LÈBRE LA ROVERE, E., Valle Costa, C., Dubeux, C. B. S. Aterros Sanitários no Brasil e o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL): Oportunidades de promoção de desenvolvimento sócio-ambiental. In: NAE-Secom/PR, 2005. **Anais eletrônicos...** São Paulo: Biogás, 2005.
- LIANG, G., WANG, M. A Fuzzy Multi-criteria Decision Method for Facility Selection, **International Journal of Production Research**, v. 29, n° 11, p. 2313-2330. 1991.
- LOKEN, E. Use of multicriteria decision analysis methods for energy planning problems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 11, n° 7, p. 1584-1595, 2007.
- LIMA, L. M. Q. **Lixo: tratamento e biorremediação**. 3. ed. Hemus Editora, 2004. 265 p.
- LIMIRO, D. **Biogás: Fonte de Desenvolvimento Sustentável e Potencial Energético**. Mestranda em Ecologia e Produção Sustentável pela Universidade Católica de Goiás. Goiânia/ Goiás. 2005.
- LIPOR, **Relatório de Sustentabilidade**, 2004. **Anais eletrônicos...** Portugal: LIPOR, 2004. Disponível em:
http://www.lipor.pt/upload/Lipor/ficheiros/Relatorio%20Sustentabilidade_04.pdf. Acesso em: Setembro de 2010.
- LORA, E.S., ANDRADE, R.V. Biomass as energy source in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.13, n° 4, p. 777-788, 2009.
- LORA, E.S, HADDAD, J. **Geração Distribuída, Aspectos Tecnológicos, Ambientais e Institucionais**. Editora Interciência Ltda, 2006. 240 p.
- MAMDANI, E. H., ASSILIAN, S. An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller. **International Journal of Man-Machine Studies**, v.7, n° 1, p. 1-13, 1975.
- MALIK, A. S., SUMAOY, C. U. Analytic hierarchy process approach in distribution utility local IRP. **Electrical Power and Energy Systems**, v. 25, p. 623–631, 2003.
- MATOS, M., “Anotações de aula”, Faculdade de Engenharia do Porto, 2010.
- MATOS, M., Eliciting and aggregating preferences with fuzzy inference systems. In: 56th Meeting of the European Working Group, p. 213-227, 2002, Coimbra. **Anais...** Coimbra: 56th Meeting of the European Working Group, 2002.
- MCBEAN, E.A., ROVERS, F. A., FARQUHAR G. J. **Solid Waste Landfill Engineering and Design**. Englewood Cliffs: Prentice Hall PTR, 1995. 521 p.

MCKENNA, J. J. Game changer: Stirling engines at landfills, Landfill Methane Outreach Program. In: 6th Annual Conference and Project Expo, 2003. Anais... EUA: IEEE, 2003.

MENDEL, J. M. Fuzzy Logic Systems for Engineering: A Tutorial. **Proceedings of the IEEE**, v. 83, n° 3, p. 345-377, 1995.

MENEZES, R., MENEZES M. A., GERLACH REAL, J. L. Estágio Atual da Incineração no Brasil. In: VII Seminário Nacional de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública, 2000, Paraná. **Anais...** Paraná: VII Seminário Nacional de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública, 2000.

MING-LING LEE, HUNG-YUAN CHUNG, FANG-MING YU, Modeling of hierarchical fuzzy systems. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 138, p. 343-361, 2003.

MOHSEN, M. S., AKASH, B. A. Evaluation of domestic solar water heating System in Jordan using Analytic Hierarchy Process. **Energy Conservation & Management**, v. 38, n°18, p. 181-1822, 1997.

MONTEIRO, J. H. P., FIGUEIREDO, C. E. M., MAGALHÃES, A. F., MELO M. A. F. de, BRITO J. C. X. de, ALMEIDA T. P. F. de, MANSUR G. L. **Manual de Gerenciamento Integrado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: IBAM, 2001.

MONTIGNAC, F., NOIROT, I., CHAUDOURNE S. Multi-criteria evaluation of on-board hydrogen storage technologies using the MACBETH approach. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 34, p. 4561-4568, 2009.

MORAN, M. J., SHAPIRO, H. N. **Princípios da Termodinâmica para Engenharia**. 4. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2002.

MUELA, E., SCHWEICKARDTB, G., GARCESA, F. Fuzzy possibilistic model for medium-term power generation planning with environmental criteria. **Energy Policy**, v. 35, p. 5643–5655, 2007.

MUYLAERT, M. S. **Consumo de energia e aquecimento do planeta – Análise do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL – do Protocolo de Quioto – Estudos de Caso**. Rio de Janeiro: Editora da Coppe, 2000.

OLIVEIRA, A. S. **Análise das Modalidades e Procedimentos Simplificados do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – Os Projetos de Pequena Escala e a Geração de Energia Renovável Para o Atendimento das Residências Rurais e Isoladas**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, dissertação de mestrado, 2003.

OLIVEIRA, A. S. de e RIBEIRO, L. da S., **Ciclo do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo e suas Implicações no Aproveitamento Energético do Biogás a partir dos Depósitos de Resíduos Sólidos**. Cetesb/SP, 2003.

PEDRYCZ, W. Why triangular membership functions? **Fuzzy Sets and Systems**, v. 64, p. 21–30, 1994.

PETROS, A., PILAVACHI, A., STILIANOS, D., STEPHANIDIS, A., VASILIOS, A., PAPPAS, A., NAIM, H., AFGAN, B. Multi-criteria evaluation of hydrogen and natural gas fuelled power plant technologies. **Applied Thermal Engineering**, v. 29, p. 2228–2234, 2009.

PERELMAN, C, OLBRECHTS-TYTECA, L. **Tratado da argumentação – A nova retórica**. 2. ed. São Paulo: Martins Fontes, 2005.

Programa de Incentivo a Fontes de Energia alternativas, Lei 10.438/2002. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/programas/proinfa>. Acesso em: Abril de 2010.

RAMIREZ-ROSADO, I. J., DOMÍNGUEZ-NAVARRO J. A. Possibilistic model based on fuzzy sets for the multiobjective optimal planning of electric power distribution networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 19, n° 4, p. 1801-1810, 2004.

RAMIREZ-ROSADO, I. J., DOMINGUEZ-NAVARRO, J. A. New multiobjective tabu search algorithm for fuzzy optimal planning of power distribution systems. **IEEE Transactions on Power Systems**. v. 21, n° 1, p. 224- 233, 2006.

ROSS, T. J. **Fuzzy logic with engineering applications**. 2. ed. John Wiley and Sons., 2004. 628 p.

ROSS, T. J. **Fuzzy logic with engineering applications**. John Wiley and Sons, 1995.

ROY, B. Classement et choix en présence de points de vue multiples (la méthode ELECTRE), **RIRO**, v. 8, p. 57–75, 1968.

RUSPINI, H. H. **Fuzzy Sets: Concepts and Characterizations**. Handbook of Fuzzy Computation. London: Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia. 1998.

RUSPINI, H. H., MAMDANI, E. H. **Why Fuzzy Logic?**. Handbook of Fuzzy Computation. London: Insitute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia, 1998.

SAATY, T. L. **The Analytic Hierarchy Process**. New York McGraw-Hill, 1980. 287 p.

SAATY, T. L. **Decision Making With Dependence and Feedback: The Analytic Network Process**. EUA: RWS Publications, 1996. 370 p.

SAATY, T. L. **Método de Análise Hierárquica**. Rio de Janeiro: Makron Books do Brasil Editora Ltda e Editora McGraw-Hill do Brasil, 1991.

SACHS, I. **Caminhos para o desenvolvimento sustentável**. 2. ed. Rio de Janeiro: Garamond, 2007. 95 p.

SALAH C. B., CHAABENE, M., BEN AMMAR, M. Multi-criteria fuzzy algorithm for energy management of a domestic photovoltaic panel. **Renewable Energy**, v. 33, p. 993–1001, 2008.

SALLES-FILHO, S. L. M. et al. **Instrumentos de apoio à definição de políticas em Biotecnologia**. DPCT– GEOPI, Campinas, 2001.

SALOMON, V. A. P., SHIMIZU, T. Utilização de matrizes de julgamentos na análise do controle de produção. **Revista Gestão Industrial**, v. 2, p. 70-78, 2006.

SALOMON, V. P., MONTEVECHI, J. A. B., PAMPLONA, E. O. Justificativas para Aplicação do Método de Análise Hierárquica. In: 19º ENEGEP, 1999, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ENEGEP, 1999.

SÁNCHEZ, D., CHACARTEGUA R., TORRESA, M, SÁNCHEZA, T. Stirling based fuel cell hybrid systems: An alternative for molten carbonate fuel cells. **Journal of Power Sources**, v. 192, n° 1, p. 84-93, 2009.

SCHMIDT, Â. M. A. **Processo de apoio à tomada de decisão – Abordagens: AHP e MACBETH**. Dissertação (Mestrado). UFSC, Florianópolis.

SCHWEICKARDT, G., MIRANDA, V. A two-stage planning and control model toward Economically Adapted Power Distribution Systems using analytical hierarchy processes and fuzzy optimization. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 31, n° 6, p. 277-284, 2009.

SCS Engineers. **Comparative analysis of landfill gas utilization technologies**. In: Northeast Regional Biomass Program Coneg Policy Research Center, Washington, 1997. **Anais eletrônicos...** Washington: SCS Engineers, 1997, p. 1-65. Disponível em: <http://www.nrbp.org/pdfs/pub07.pdf>. Acesso em: Abril de 2010.

SEITARIDES, T., ATHANASIOU, C., ZABANIOTOU, A. Modular biomass gasification-based solid oxide fuel cells (SOFC) for sustainable development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 12, p.1251–1276, 2008.

SERPA, A. C. A., LIMA, L. M. Q. **Processo de metanização de resíduos orgânicos**. Cap. III. Projeto Phoenix. Pesquisa de resíduos sólidos em Campinas, Prefeitura Municipal de Campinas, SP, 1984.

SHAW, I. S., SIMÕES, M. G. **Controle e Modelagem Fuzzy**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda. 1999. 168 p.

SHIMIZU, T. **Decisão nas organizações**. São Paulo: Atlas, 2001. 317 p.

SHRESTHA, S. O. B., NARAYANAN G. Landfill gas with hydrogen addition – A fuel for SI engines. **Fuel**, v. 87, p. 3616–3626, 2008.

SOARES, C. **Microturbinas**. Illustrated Edition: Elsevier, 2007. 271 p.

SOLVI, Casos Brasileiros - Aterro Metropolitano Centro – Salvador – BA, 2010. **Anais eletrônicos...** Brasil: SOLVI, 2010. Disponível em: <http://www.abar.org.br/rgr/09/ABAR.pdf>

SOLVI, Relatório anual 2010 - exercício 2009. **Anais eletrônicos...** Brasil: SOLVI, 2010. Disponível em:

SPIEGEL R.J., TROCCIOLA C., PRESTON J.L. Fuel cell operation on landfill gas at Penrose Power Station. **Energy**, v. 22, n° 8, p.777–786, 1997.

SPIEGEL R.J., TROCCIOLA C., PRESTON J.L. Test results for fuel-cell operation on landfill gas. **Energy**, v. 24, p.723–742, 1999.

SPIEGEL R.J., PRESTON J.L. Technical assessment of fuel cell operation on landfill gas at the Groton, CT, landfill. **Energy**, v. 28, p.397–409, 2003.

SPOKAS, K., BOGNER, J., CHANTON, J.P., MORCET, M., ARAN, C., GRAFF, C., MOREAU-LE GOLVAN, Y., HEBE. I. Methane mass balance at three landfill sites: What is the efficiency of capture by gas collection systems?. **Waste Management**, v. 26, n° 5, p. 516-525, 2006.

TSETLIN, I., R. WINKLER. Decision Making with Multiattribute Performance Targets: The Impacts of Changes in Performance and Target Distributions. **Operations Research**, v. 55, n° 2, p. 226 – 233, 2007.

TOLMASQUIM, M. T. **Fontes renováveis de energia no Brasil**. Rio de Janeiro: Interciência, Cinergia, 2003. 515 p.

TROGISCH S., HOFFMANN J., BERTRAND L.D. Operation of molten carbonate fuel cells with different biogas sources: a challenging approach for field trials. **Journal of Power Sources**, v. 45, n° 2, p. 632–638, 2005.

URBAN, W., LOHMANN, H., SALAZAR GÓMEZ, J. I. Catalytically upgraded landfill gas as a cost-effective alternative for fuel cells. **Journal of Power Sources**, v. 193, n° 1, p. 359-366, 2009.

USEPA. **U.S. Environmental Protection Agency and Science Applications International Corporation (USEPA and SAIC)**, Environmental Impact Assessment Guidelines for New Source Fossil Fueled Steam Electric Generating Stations, Washington D.C. USEPA, 1994,

VAN HERLE, J., MARECHAL, F., LEUENBERGER, S., FAVRAT, D. Energy balance model of a SOFC cogenerator operated with biogas. **Journal of Power Sources**, v. 118, n° 1, p. 375–383, 2003.

VIRANT, J. **Design Considerations of Time in Fuzzy Systems**. Springer, 2000. 512 p.

WALKER, G. **Stirling Engines**. Clarendon Press, Oxford, 1980.

WALLENIUS, J., DYER, J. S., FISHBURN, P.C., STEUER, R.E., ZIONTS, S. and DEB, K. Multiple Criteria Decision Making, Multiattribute Utility Theory: Recent Accomplishments and What Lies Ahead. **Management Science archive**, v. 54 , n° 7, p. 1336-1349, 2008.

WANG, L., GANG, H., GONG, X., BAO, L. Emission reductions potential for energy from municipal solid waste incineration in Chongqing. **Renewable Energy**, v. 34, p. 2074–2079, 2009.

WANG, JIANG-JIANG, JING, YOU-YIN, ZHANG, CHUN-FA, SHI, GUO-HUA, ZHANG, XU-TAO. A fuzzy multi-criteria decision-making model for trigeneration system. **Energy Policy**, v. 36, n° 10, p. 3823-3832, 2008.

WANG, JIANG-JIANG, JING, YOU-YIN, ZHANG CHUN-FA, ZHAO, JUN-HONG. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n° 9, p. 2263-2278, 2009.

WEDLEY, W.C., UNG CHOO, E., SCHONER, B. Magnitude adjustment for AHP benefit/cost ratios. **European Journal of Operational Research**, v. 133, n° 2, p. 342-35, 2001.

WIESE, A., KALTSCHMITT, M., WOO YUL LEE. Renewable power generation – a status report. **Renewable Energy Focus**, v. 10, n° 4, p. 64-69, 2009.

WILLUMSEN, H. C. **Energy recovery from land fill gas in Denmark and worldwide**. LG Consultant, 2001.

YUSOFF, M., MUTALIB, S., RAHMAN, S. A., MOHAMED, A. Intelligent Water Dispersal Controller: Comparison between Mamdani and Sugeno Approaches. In: Proceedings of the International Conference Computational Science and its Applications, 2007. **Anais...** Malaysia: ICCSA, 2007

ZADEH, L. A. Fuzzy Sets, **Information and Control**, v. 8, n° 3, p. 338–353, 1965.

ZIMMERMANN, H-J. **Practical applications of fuzzy technologies**. Springer, 1999. 667 p.

ZULAUF, M. **Geração com biogas de aterros de lixo**. Dossiê Energia Positiva para o Brasil, 2004.

APÊNDICE A - BASE DE REGRAS DETALHADA CONSTRUÍDA ÀS MODELAGENS 1 E 2, E BASE DE REGRAS SIMPLIFICADA CRIADA À MODELAGEM 3 (ORIGINAL).

APÊNDICE A - Principais caracterizações da modelagem 1

Antes de demonstrar o conjunto de Tabelas apresentando toda base de regras criadas com a aplicação das Meta-regras de aferição, é necessário recordar os seguintes aspectos referentes a modelagem 1.

1) A perspectiva A na etapa de relevância prévia dos critérios, de acordo com a seguinte ordem de importância (relevância).

Ordenação de prioridades: Perspectiva A – 1° A, 2° B, 3° C, 4° D, 5° E e 6° F.

Desta forma, para as diferentes perspectivas avaliadas neste estudo de caso, deve-se seguir a mesma ordem de relevância da perspectiva A apresentada.

2) Meta-regras, de acordo com a ordem de prioridade de atuação:

- Meta-regra Base que não pode ser alterada, por uma questão de raciocínio lógico.
- Meta-regra Genérica de Construção com alteração de 3 em 3 saídas (S).
- Meta-regra de Construção início/fim.

1a - SE $A = VL$ e $B = VL$ e $C = VL$, ENTÃO $S = VL$; para quaisquer variações de C, D, E, F.

1b - SE $A = VH$ e $B = VH$ e $C = VH$, ENTÃO $S = VH$; para quaisquer variações de C, D, E, F.

- Meta-regra de Construção e Adição, onde só há adição no valor de pertinência da saída (S) fazendo uso do critério E, aumentando o grau de S para H – em $E = VH$ (S^{*H}); e aumentando o grau de S para H em $E = H$ ($S^{\#H}$); e uso dos critérios E e F, aumentando o grau de S para VH – em $E = VH$ e $F = VH$ (S^{*VH}).

- Meta-regras de Aferição:

2a - SE $A = VL$, ENTÃO $S \leq M$; para quaisquer variações de B, C, D, E, F (importância a A).

2b - SE $A = VH$, ENTÃO $S \geq M$; para quaisquer variações de B, C, D, E, F (importância a A).

2c - SE $A = L$, ENTÃO $S \leq H$; para quaisquer variações de B, C, D, E, F (importância a A).

2d - SE $A = H$, ENTÃO $S \geq L$; para quaisquer variações de B, C, D, E, F (importância a A).

3a - SE $A < L$ e $B < M$, ENTÃO $S \leq L$; para e quaisquer variações de C, D, E, F (importância a A e B).

3b - SE $A < M$ e $B < H$, ENTÃO $S \leq M$. para e quaisquer variações de C, D, E, F (importância a A e B).

3c - SE $A > M$ e $B > L$, ENTÃO $S > L$. para e quaisquer variações de C, D, E, F (importância a A e B).

3d - SE $A > H$ e $B > M$, ENTÃO $S > M$. para e quaisquer variações de C, D, E, F (importância a A e B).

As Tabela 1, 2, 3, 4 e 5 apresentam a base construtiva detalhada da modelagem 1,

Tabela 1 – Base construtiva das regras - Modelagem 1 para A=VL.

| B=VL | B=L | B=M | B=H | B=VH |
|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| VL (META BASE) | VL | VL | VL | L |
| VL (META 1a) | VL | VL | L | L |
| VL (META 1a) | VL | L | L | L |
| VL (META 1a) | L | L | L | M |
| VL (META 1a) | L | L | M | M |
|Inicio | | | | |
| VL | VL | VL | L | L |
| VL | VL | L | L | L |
| VL | L | L | L | M |
| L | L | L | M | M |
| L | L | M | M | M |
| | | | | |
| VL | VL | L | L | L |
| VL | L | L | L | M |
| L | L | L | M | M |
| L | L | M | M | M |
| L | L (META 3a) | M | M | m (META 2a) |
| | | | | |
| VL | L | L | L | M |
| L | L | L | M | M |
| L | L | M | M | M |
| L | L (META 3a) | M | M | m (META 2a) |
| L (META 3a) | L (META 3a) | M | m (META 2a) | m (META 2a) |
| | | | | |
| L | L | L | M | M |
| L | L | M | M | M |
| L | L (META 3a) | M | M | m (META 2a) |
| L (META 3a) | L (META 3a) | M | m (META 2a) | m (META 2a) |
| L (META 3a) | L (META 3a) | m (META 2a) | m (META 2a) | m (META 2a) |

Tabela 2 – Base construtiva das regras - Modelagem 1 para A=L.

| B=VL | B=L | B=M | B=H | B=VH |
|------|-----------------|-------------|-----------------|-----------------|
| VL | VL | VL | L | L |
| VL | VL | L | L | L |
| VL | L | L | L | M |
| L | L | L | M | M |
| L | L | M | M | M |
| | | | | |
| VL | VL | L | L | L |
| VL | L (META BASE) | L | L | M |
| L | L | L | M | M |
| L | L | M | M | M |
| L | M | M | M | M* ^H |
| | | | | |
| VL | L | L | L | M |
| L | L | L | M | M |
| L | L | M | M | M |
| L | M | M | M | M* ^H |
| M | M | M | M* ^H | M ^{#H} |
| | | | | |
| L | L | L | M | M |
| L | L | M | M | M |
| L | M | M | M | M* ^H |
| M | M | M | M* ^H | M ^{#H} |
| M | M | M (META 3b) | M ^{#H} | H |
| | | | | |
| L | L | M | M | M |
| L | M | M | M | M* ^H |
| M | M | M | M* ^H | M ^{#H} |
| M | M | M (META 3b) | M ^{#H} | H |
| M | M* ^H | M (META 3b) | H | H |

Tabela 3 – Base construtiva das regras - Modelagem 1 para A=M.

| B=VL | B=L | B=M | B=H | B=VH |
|-----------------|-----------------|--------------------------|-----------------|-----------------|
| VL | VL | L | L | L |
| VL | L | L | L | M |
| L | L | L | M | M |
| L | L | M | M | M |
| L | M | M | M | M* ^H |
| | | | | |
| VL | L | L | L | M |
| L | L | L | M | M |
| L | L | M | M | M |
| L | M | M | M | M* ^H |
| M | M | M | M* ^H | M ^{#H} |
| | | | | |
| L | L | L | M | M |
| L | L | M | M | M |
| L | M | M _(META BASE) | M | M* ^H |
| M | M | M | M* ^H | M ^{#H} |
| M | M | M* ^H | M ^{#H} | H |
| | | | | |
| L | L | M | M | M |
| L | M | M | M | M* ^H |
| M | M | M | M* ^H | M ^{#H} |
| M | M | M* ^H | M ^{#H} | H |
| M | M* ^H | M ^{#H} | H | H |
| | | | | |
| L | M | M | M | M* ^H |
| M | M | M | M* ^H | M ^{#H} |
| M | M | M* ^H | M ^{#H} | H |
| M | M* ^H | M ^{#H} | H | H |
| M* ^H | M ^{#H} | H | H | H |

Tabela 4 – Base construtiva das regras - Modelagem 1 para A=H.

| B=VL | B=L | B=M | B=H | B=VH |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| L (META 2d) | L | L | L | L |
| L | L | L | M | M |
| L | L | M | M | M |
| L | M | M | M | M ^{*H} |
| M | M | M | M ^{*H} | M ^{#H} |
| | | | | |
| L | L | L | M | M |
| L | L | M | M | M |
| L | M | M | M | M ^{*H} |
| M | M | M | M ^{*H} | M ^{#H} |
| M | M | M ^{*H} | M ^{#H} | H |
| | | | | |
| L | L | M | M | M |
| L | M | M | M | M ^{*H} |
| M | M | M | M ^{*H} | M ^{#H} |
| M | M | M ^{*H} | M ^{#H} | H |
| M | M ^{*H} | M ^{#H} | H | H |
| | | | | |
| L | M | M | M | M ^{*H} |
| M | M | M | M ^{*H} | M ^{#H} |
| M | M | M ^{*H} | M ^{#H} | H |
| M | M ^{*H} | M ^{#H} | H (META BASE) | H |
| M ^{*H} | M ^{#H} | H | H | H |
| | | | | |
| M | M | M | M ^{*H} | M ^{#H} |
| M | M | M ^{*H} | M ^{#H} | H |
| M | M ^{*H} | M ^{#H} | H | H |
| M ^{*H} | M ^{#H} | H | H | H |
| M ^{#H} | H | H | H | H ^{*VH} |

Tabela 5 – Base construtiva das regras - Modelagem 1 para A=VH.

| B=VL | B=L | B=M | B=H | B=VH |
|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|--------------------|
| m (META 2b) | m (META 2b) | m (META 2b) | m (META 2b) | m (META 2b) |
| m (META 2b) | m (META 2b) | M | M | M |
| m (META 2b) | M | M | M | M* ^H |
| M | M | M | M* ^H | M ^{#H} |
| M | M | M* ^H | M ^{#H} | H |
| | | | | |
| L | m (META 2b) | M | M | M |
| L | M | M | M | M* ^H |
| M | M | M | M* ^H | M ^{#H} |
| M | M | M* ^H | M ^{#H} | H |
| M | M* ^H | M ^{#H} | H | H |
| | | | | |
| L | M | M | M | M* ^H |
| M | M | M | M* ^H | M ^{#H} |
| M | M | M* ^H | M ^{#H} | H |
| M | M* ^H | M ^{#H} | H | H |
| M* ^H | M ^{#H} | H | H | H |
| | | | | |
| M | M | M | M* ^H | M ^{#H} |
| M | M | M* ^H | M ^{#H} | H |
| M | M* ^H | M ^{#H} | H | H |
| M* ^H | M ^{#H} | H | H | H |
| M ^{#H} | H | H | H | H * ^{VH} |
| | | | |fim |
| M | M | M* ^H | M ^{#H} | VH META 1b – INIC. |
| M | M* ^H | M ^{#H} | H | VH META 1b – INIC. |
| M* ^H | M ^{#H} | H | H | VH META 1b – INIC. |
| M ^{#H} | H | H | H | VH META 1b – INIC. |
| H | H | H | H * ^{VH} | VH (META BASE) |

O número final de regras construídas na modelagem 1 foi de 1082 regras. Considerando que a modelagem 1 faz uma avaliação de 6 critérios, caso não fossem utilizadas determinadas meta-regras, como a Meta-regra de Construção e Adição, o número final de regras na consideração de 6 critérios poderia chegar a 15625 regras.

Principais Caracterizações da Modelagem 2

1) A perspectiva A na etapa de relevância prévia dos critérios, de acordo com a seguinte ordem de importância (relevância).

Perspectiva A – 1° A, 2° B, 3° C, 4° D, 5° E.

Deve-se observar que nesta modelagem o critério A é significativamente mais importante que os demais critérios, propiciada neste caso pela Meta-regra de Construção início/fim com elevada consequência de corte, diferentemente da modelagem 1 onde A era apenas um pouco mais importante que os critérios B, C e D.

2) Meta-regras, de acordo com a ordem de prioridade de atuação:

- Meta-regra Base que não pode ser alterada, por uma questão de raciocínio lógico.
- Meta-regra Genérica de Construção com alteração de 3 em 3 saídas (S).
- Meta-regra de Construção início/fim.

1a' - SE A = VL, ENTÃO S = VL; para quaisquer variações de C, D, E.

1b' - SE A = VH, ENTÃO S = VH; para quaisquer variações de C, D, E.

É necessário observar que a Meta-regra de Construção início/fim atribuída a esta modelagem atribui uma relevância ou importância muito maior ao critério A em comparação a modelagem 1.

- Meta-regra de Construção e Adição onde só há adição no valor de pertinência da saída (S) fazendo uso do critério E, aumentando o grau de S para H – em E = VH (S^{*H}); aumentando o grau de S para H - em E =H ($S^{\#H}$). Nesta modelagem apenas o critério E foi considerado para regra de adição; não houve consideração do critério F.

- Meta-regras de Aferição (numeradas para localização nas Tabelas)

2c. SE A = L, ENTÃO S ≤ H; para quaisquer variações de B, C, D, E (importância a A).

2d. SE A=H, ENTÃO S ≥ L; para quaisquer variações de B, C, D, E (importância a A).

3a. SE A < L e B < M, ENTÃO S ≤ L; para e quaisquer variações de C, D, E (importância a A e B).

3b. SE A < M e B < H, ENTÃO S ≤ M. para e quaisquer variações de C, D, E (importância a A e B).

3c. SE A > M e B > L, ENTÃO S > L. para e quaisquer variações de C, D, E (importância a A e B).

3d. SE A > H e B > M, ENTÃO S > M. para e quaisquer variações de C, D, E (importância a A e B).

4a. SE B=VL, ENTÃO S ≤ M; para quaisquer variações de C, D, E (importância a B).

4b. SE B=VH, ENTÃO S ≥ M; para quaisquer variações de C, D, E (importância a B).

5a. SE A ≤ M e B ≤ A e C < A e D < A, ENTÃO S < A; para quaisquer de E (importância a C, D).

5b. SE A ≥ M e B ≥ A e C > A e D > A, ENTÃO S > A; para quaisquer de E (importância a C, D).

Observando as Meta-regras de Aferição, pode-se verificar que estas atribuem importâncias (relevâncias) aos critérios A, B, C e D na modelagem 2, adicionalmente ao caso da modelagem 1 onde apenas aos critérios A e B foram atribuídas relevâncias.

As Tabelas 6, 7 e 8, apresentam a base construtiva detalhada da modelagem 2, demonstrando a aplicação de todas as meta-regras envolvidas. As tabelas com A=VL e A=VH não precisam ser apresentadas considerando as meta-regras 1a e 1b'.

Tabela 6 – Base construtiva das regras - Modelagem 2 para A=LOW.

| Critério A = LOW | | | | |
|------------------|---------------|-------------|-----------------|-----------------|
| B=VL | B=L | B=M | B=H | B=VH |
| VL | VL | VL | L | L (META 4b) |
| VL | VL | L | L | L (META 4b) |
| VL | L | L | L | M |
| L | L | L | M | M |
| L | L | M | M | M |
| | | | | |
| VL | VL | L | L | L |
| VL | L (META BASE) | L | L | M |
| L | L | L | M | M |
| L | L | M | M | M |
| L | M | M | M | M* ^H |
| | | | | |
| VL | L | L | L | M |
| L | L | L | M | M |
| L | L | M | M | M |
| L | M | M | M | M* ^H |
| M | M | M | M* ^H | M ^{#H} |
| | | | | |
| L | L | L | M | M |
| L | L | M | M | M |
| L | M | M | M | M* ^H |
| M | M | M | M* ^H | M ^{#H} |
| M | M | M (META 3b) | M ^{#H} | H |
| | | | | |
| L | L | M | M | M |
| L | M | M | M | M* ^H |
| M | M | M | M* ^H | M ^{#H} |
| M | M | M (META 3b) | M ^{#H} | H |
| M | M (META 3b) | M (META 3b) | H | H |
| | | | | |

Tabela 7 – Base construtiva das regras - Modelagem 2 para A=MED.

| Critério A = Med | | | | |
|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| B=VL | B=L | B=M | B=H | B=VH |
| VL | VL | L | L | M (META 4b) |
| VL | L | L | L | M |
| L | L | L | M | M |
| L | L | M | M | M |
| L | M | M | M | M* ^H |
| | | | | |
| VL | L | L | L | M |
| L (META BASE) | L | L | M | M |
| L | L | M | M | M |
| L | M | M | M | M* ^H |
| M | M | M | M* ^H | M ^{#H} |
| | | | | |
| L | L | L | M | M |
| L | L | M | M | M |
| L | M | M (META BASE) | M | M* ^H |
| M | M | M | M* ^H | M ^{#H} |
| M | M | M* ^H | M ^{#H} | H |
| | | | | |
| L | L | M | M | M |
| L | M | M | M | M* ^H |
| M | M | M | M* ^H | M ^{#H} |
| M | M | H (META 5b) | H (META 5b) | H |
| M | M* ^H | H (META 5b) | H | H |
| | | | | |
| L | M | M | M | M* ^H |
| M | M | M | M* ^H | M ^{#H} |
| M | M | M* ^H | M ^{#H} | H |
| M | M* ^H | H (META 5b) | H | H |
| M (META 4a) | M ^{#H} | H | H | H |
| | | | | |

Tabela 8 – Base construtiva das regras - Modelagem 2 para A=HIGH.

| Critério A = H | | | | |
|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| B=VL | B=L | B=M | B=H | B=VH |
| L (META 2d) | L | L | L | M (META 4b) |
| L | L | L | M | M |
| L | L | M | M | M |
| L | M | M | M | M* ^H |
| M | M | M | M* ^H | M ^{#H} |
| | | | | |
| L | L | L | M | M |
| L | L | M | M | M |
| L | M | M | M | M* ^H |
| M | M | M | M* ^H | M ^{#H} |
| M | M | M* ^H | M ^{#H} | H |
| | | | | |
| L | L | M | M | M |
| L | M | M | M | M* ^H |
| M | M (META BASE) | M | M (META 5a) | M ^{#H} |
| M | M | M* ^H | M ^{#H} | H |
| M | M* ^H | M ^{#H} | H | H |
| | | | | |
| L | M | M | M | M* ^H |
| M | M | M | M* ^H | M ^{#H} |
| M | M | M* ^H | M ^{#H} | H |
| M | M* ^H | M ^{#H} | H (META BASE) | H |
| M (META 4a) | M ^{#H} | H | H | H |
| | | | | |
| M | M | M | M* ^H | M ^{#H} |
| M | M | M* ^H | M ^{#H} | H |
| M | M* ^H | M ^{#H} | H | H |
| M (META 4a) | M ^{#H} | H | H | H |
| M (META 4a) | H | H | VH (META 5b) | VH (META 5b) |
| | | | | |

O número final de regras construídas na modelagem 2 foi de 625 regras. Considerando que a modelagem 2 faz uma avaliação de 5 critérios, caso não fossem utilizadas determinadas meta-regras, como a Meta-regra de Construção e Adição, o número final de regras na consideração de 5 critérios poderia chegar a 3125 regras. A redução do número de regras criadas nesta modelagem é propiciada pela Meta-regra de Construção início/fim, que traz uma consequência de corte a modelagem 2. É necessário recordar que esta consequência de corte em um processo de inferência fuzzy tende a causar problemas na base de regras, como a não

continuidade que é, muitas vezes, difícil de justificar e relacionar com as preferências do agente de decisão.

Principais caracterizações da modelagem 3

A modelagem 3 foi denominada de Modelagem Original pois a principal meta-regra que atua nesta modelagem é a Meta-regra Base, que poderia ser considerada como universal em qualquer modelagem de variáveis subjetivas para a criação das regras em processos de inferência. Além disso, neste caso são considerados apenas 4 critérios, A, B, C e D, não sendo avaliados os critérios E e F.

Seguindo a Meta-regra Base, a única outra meta-regra utilizada nesta modelagem foi a Meta-regra Genérica de Construção com alteração de 4 em 4 saídas (S). A opção pela alteração de 4 em 4 saídas é justificada exatamente pela meta-regra Base, sendo que neste caso, por não ter sido utilizada quaisquer outras meta-regras – como a Meta-regra de Construção e Adição, por exemplo – a aplicação de alteração de 3 em 3 saídas não iria respeitar a Meta-regra Base.

Na Tabela 9 são apresentadas as regras construídas na modelagem 3 de forma simplificada. A explicação da construção de forma simplificada segue a análise da Tabela 4.2 recordando que, por exemplo, o critério A=VL está representado com B=VL, L, M, H e VH; cada conjuntos de 5 células separados em cada coluna representam C= VL, L, M, H e VH; e cada célula dentro destes conjuntos representa D =VL, L, M, H e VH.

Neste caso, a construção das regras obedece a Meta-regra Genérica de Construção com alteração de 4 em 4 saídas, sendo este um processo em forma de “escada” – observe que os conjuntos de 5 células nas diagonais da tabela são correspondentes. As células com a descrição “Base” na Tabela 9 indicam onde as Meta-regras Base atuam, também servindo como ponto de referência para a clarificação da forma construtiva da tabela. O número final de regras construídas na modelagem 3 foi de 625 regras. Neste caso, são considerados apenas 4 critérios, A, B, C e D, não sendo avaliados os critérios E e F.

Tabela 9 – Base construtiva das regras de forma simplificada - Modelagem 3.

| <i>A=VL</i> | | | | | <i>A=L</i> | <i>A=Med</i> | <i>A=H</i> | <i>A=VH</i> |
|---|------------|---|------------|---|-------------|---|-------------|---|
| <i>B=VL</i> | <i>B=L</i> | <i>B=M</i> | <i>B=H</i> | <i>B=VH</i> | <i>B=VH</i> | <i>B=VH</i> | <i>B=VH</i> | <i>B=VH</i> |
| <i>VL_{META}</i> <i>BASE</i> | VL | VL | VL | L | L | L | L | M |
| VL | VL | VL | L | L | L | L | M | M |
| VL | VL | L | L | L | L | M | M | M |
| VL | L | L | L | L | M | M | M | M |
| L | L | L | L | M | M | M | M | H |
| | | | | | | | | |
| VL | VL | VL | L | L | L | L | M | M |
| VL | VL | <i>L_{META}</i> <i>BASE)</i> | L | L | L | M | M | M |
| VL | L | L | L | L | M | M | M | M |
| L | L | L | L | M | M | M | M | H |
| L | L | L | M | M | M | M | H | H |
| | | | | | | | | |
| VL | VL | L | L | L | L | M | M | M |
| VL | L | L | L | L | M | M | M | M |
| L | L | L | L | <i>M_{META}</i> <i>BASE)</i> | M | M | M | H |
| L | L | L | M | M | M | M | H | H |
| L | L | M | M | M | M | H | H | H |
| | | | | | | | | |
| VL | L | L | L | L | M | M | M | M |
| L | L | L | L | M | M | M | M | H |
| L | L | L | M | M | M | M | H | H |
| L | L | M | M | M | M | <i>H_{META}</i> <i>BASE)</i> | H | H |
| L | M | M | M | M | H | H | H | H |
| | | | | | | | | |
| L | L | L | L | M | M | M | M | H |
| L | L | L | M | M | M | M | H | H |
| L | L | M | M | M | M | H | H | H |
| L | M | M | M | M | H | H | H | H |
| M | M | M | M | H | H | H | H | <i>VH_{(META}</i> <i>BASE)</i> |

Resultados das simulações – modelagens 2 e 3

Os valores de entrada nas modelagens 2 e 3 são exatamente iguais aos dados aplicados a modelagem 1. Na Tabela 5.2 , reapresentada abaixo, estão apresentados os valores finais que são inseridos ou simulados diretamente na metodologia de ajuda a decisão.

Tabela 5.2 - Entrada de dados na metodologia de ajuda a decisão – Estudo de Caso Principal.

| RES | EF | FP | US\$/kW | Vida | SA | IMP |
|------|------|------|---------|------|------|------|
| TG | 0,00 | 0.40 | 0,83 | 0,94 | 0.40 | 0.50 |
| MT | 0,12 | 1,00 | 0,79 | 1,00 | 0.90 | 0.80 |
| OTTO | 0,40 | 0.90 | 1,00 | 0,50 | 0.50 | 0.40 |
| STIR | 0,20 | 0.70 | 0,63 | 0,62 | 0.50 | 0.50 |
| PA | 0,60 | 0.70 | 0,42 | 0,50 | 0.80 | 0.80 |
| MC | 1,00 | 0.90 | 0,21 | 0,31 | 0.80 | 0.90 |
| SO | 1,00 | 0.60 | 0,00 | 0,62 | 0.80 | 0.90 |

Tempo de vida útil do aterro: 16 anos; potência do sistema de geração: 1MW.

A etapa de relevância previa realizada pelos ADs é exatamente a mesma para as modelagens 1 e 2. Conforme já descrito, as perspectivas criadas são (na modelagem 2 o critério F não é considerado):

- perspectiva REVITA: 1° custos, 2° eficiência, 3° vida útil, 4° faixa de potência, 5° impactos ambientais, 6° serviços ancilares.
- perspectiva CONCESSIONÀRIA: 1° faixa de potência, 2° serviços ancilares, 3° impactos ambientais, 4° vida útil, 5° eficiência, 6° custos de instalação.
- perspectiva SEC. MEIO AMBIENTE: 1° impactos ambientais, 2° vida útil, 3° eficiência, 4° faixa de potência, 5° serviços ancilares, 6° custos.
- perspectiva REVITA/CONCESSIONÀRIA: 1° custos, 2° faixa de potência, 3° eficiência, 4° serviços ancilares, 5° vida útil, 6° impactos ambientais.

Para a modelagem 3, apenas os quatro primeiro critérios de cada perspectiva são considerados e não existem prioridades entre os mesmos, ou seja, o que interessa nesta modelagem é quais critérios serão avaliados e não o estabelecimento de relevâncias entre estes critérios. Desta forma, para a modelagem 3, é possível apresentar as perspectivas da seguinte forma:

- perspectiva REVITA: custos, eficiência, vida útil e faixa de potência – sem relevâncias, ou seja, para qualquer ordenação entre os critérios.
- perspectiva CONCESSIONÀRIA: faixa de potência, serviços ancilares, impactos ambientais e vida útil – para qualquer ordenação entre os critérios.

- perspectiva SEC. MEIO AMBIENTE: impactos ambientais, vida útil, eficiência e faixa de potência – para qualquer ordenação entre os critérios.

- perspectiva REVITA/CONCESSIONÁRIA: custos, faixa de potência, eficiência e serviços ancilares – para qualquer ordenação entre os critérios.

A classificação final proveniente das simulações realizadas com a modelagem 2 está apresentada nas Tabelas 10 e 11, considerando as perspectivas REVITA, CONCESSIONÁRIA, SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE e REVITA/CONCESSIONÁRIA.

Tabela 10 – Classificação final pela modelagem 2 - perspectivas da REVITA e da CONCESSIONÁRIA

| Fontes | PRF - REVITA | CL | PRF - CONC | CL |
|--------|--------------|----|------------|----|
| TG | 0,598 | 3° | 0,500 | 6° |
| MT | 0,626 | 2° | 0,920 | 1° |
| OTTO | 0,920 | 1° | 0,665 | 4° |
| STIR | 0,428 | 6° | 0,500 | 6° |
| PAFC | 0,567 | 5° | 0,605 | 5° |
| MCFC | 0,588 | 4° | 0,797 | 2° |
| SOFC | 0,008 | 7° | 0,750 | 3° |

Tabela 11 – Classificação final pela modelagem 2 - perspectivas da SEC. MEIO AMBIENTE e perspectiva conjunta REVITA e CONCESSIONÁRIA DE ENERGIA.

| Fontes | PRF – SEC. MA | CL | PRF – REV/CONC | CL |
|--------|------------------|----|-------------------|----|
| TG | 0,500 | 4° | 0,486 | 5° |
| MT | 0,757 | 2° | 0,755 | 2° |
| OTTO | 0,500 | 4° | 0,920 | 1° |
| STIR | 0,428 | 5° | 0,428 | 6° |
| PAFC | 0,612 | 3° | 0,605 | 3° |
| MCFC | 0,797 | 1° | 0,588 | 4° |
| SOFC | 0,797 | 1° | 0,008 | 7° |

Observando os dados da Tabela 10, obtidos pela simulação da modelagem 2, para a avaliação da perspectiva REVITA houve uma troca de posições no ranking final, em comparação aos resultados da modelagem 1, sendo que o sistema OTTO recebeu a maior pontuação, considerando as novas meta-regras de Aferição aplicadas a modelagem 2, com uma grande consequência de corte. Ainda nesta perspectiva, estas mesmas meta-regras são responsáveis pelo resultado da alternativa SOFC – 0,08 (consequência de corte nas regras,

atribuição do valor de saída de acordo com a avaliação direta do critério mais prioritário, neste caso o critério custos). Na perspectiva CONCESSIONÁRIA também é possível observar a atuação de tais regras no valor de saída da MT, embora não tenha alterado a posição da mesma no ranking, em comparação a modelagem 1. Na perspectiva SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE, apresentada na Tabela 11, as células SOFC e MCFC assumiram a posição da MT como melhor opção. Considerando, por exemplo, o ranking da modelagem 1 para esta mesma perspectiva, percebe-se uma proximidade muito grande entre os valores de saída destas alternativas, o que justifica alterações no ranking final com a adição ou modificação das regras de aferição descritas. Novamente, na perspectiva REVITA/CONCESSIONÁRIA, apresentada na Tabela 11, é possível observar as consequências de corte, na seleção do sistema OTTO como melhor alternativa e da célula SOFC como pior. A meta-regra que provoca essa consequência – Meta-regra de construção início/fim – pode ser responsável por modificações significativas no ranking final, alterando a seleção da tecnologia mais apropriada para o processo decisório em questão.

A classificação final proveniente das simulações realizadas com a modelagem 3 está apresentada nas Tabelas 12 e 13, considerando as perspectivas REVITA, CONCESSIONÁRIA, SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE e REVITA/CONCESSIONÁRIA.

Tabela 12 – Classificação final pela modelagem 3 - perspectivas da REVITA e da CONCESSIONÁRIA

| Fontes | PRF - REVITA | CL | PRF - CONC | CL |
|--------|--------------|----|------------|----|
| TG | 0,423 | 6° | 0,423 | 6° |
| MT | 0,621 | 2° | 0,757 | 1° |
| OTTO | 0,645 | 1° | 0,500 | 5° |
| STIR | 0,428 | 5° | 0,500 | 5° |
| PAFC | 0,433 | 4° | 0,560 | 4° |
| MCFC | 0,500 | 3° | 0,645 | 2° |
| SOFC | 0,500 | 3° | 0,621 | 3° |

Tabela 13 – Classificação final pela modelagem 3 - perspectivas da SEC. MEIO AMBIENTE e perspectiva conjunta REVITA e CONCESSIONÁRIA DE ENERGIA.

| Fontes | PRF – SEC. MA | CL | PRF – REV/CONC | CL |
|--------|------------------|----|-------------------|----|
| TG | 0,395 | 6° | 0,342 | 6° |
| MT | 0,621 | 3° | 0,621 | 2° |
| OTTO | 0,395 | 6° | 0,645 | 1° |
| STIR | 0,428 | 5° | 0,428 | 5° |
| PAFC | 0,567 | 4° | 0,567 | 3° |
| MCFC | 0,645 | 1° | 0,645 | 1° |
| SOFC | 0,639 | 2° | 0,500 | 4° |

Antes de analisarmos os dados obtidos através das simulações com a modelagem 3, é interessante lembrar que esta modelagem considera apenas os quatro primeiros critérios de cada perspectiva e que não existem prioridades entre os critérios.

Observando a Tabela 12 é possível verificar que para a perspectiva REVITA – neste caso, a perspectiva representa apenas os critérios escolhidos pelo AD – o sistema OTTO foi selecionado como a melhor alternativa, sendo a MT a segunda colocada no ranking; para a perspectiva CONCESSIONÁRIA, a MT foi selecionada como melhor opção, sendo a MCFC a segunda colocada no ranking.

Observando a Tabela 13 é possível verificar que para a perspectiva SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE as células MCFC, SOFC e a MT ocupam as três primeiras posições do ranking; para a perspectiva REVITA/CONCESSIONÁRIA a célula MCFC foi selecionada como melhor opção juntamente com o sistema OTTO, sendo a MT a segunda colocada no ranking.

Fazendo uma relação breve da modelagem 3 com as demais modelagens simuladas, percebe-se claramente algumas trocas de posição, justificadas pela exclusão das Meta-regras de aferição e construção início/fim, assim como modificação da Meta-regra Genérica de Construção. Nesta modelagem uma das tecnologias que mais se destacou foi a microturbina, selecionada entre as melhores opções para as diferentes perspectivas. A célula a combustível MCFC também esteve entre as melhores opções selecionadas, exceto na perspectiva REVITA, onde o critério vida útil foi responsável pelo mau desempenho desta tecnologia.

Para finalizar as discussões sobre as modelagens abordadas neste apêndice, devemos primeiramente observar que o objetivo da realização das diferentes modelagens é apresentar possibilidades de aplicação da metodologia de ajuda a decisão, e não comparar diretamente os resultados entre elas. De qualquer forma, como a modelagem 3 não apresenta Meta-regras de

aferição e/ou construção início/fim – que atribuem prioridades aos critérios – os resultados encontrados podem ser considerados os mais próximos possíveis da aplicação tradicional da lógica fuzzy. Ainda sobre esta modelagem, a opção por avaliar apenas 4 critérios se deve a possibilidade de apresentação e verificação de um número aceitável de regras – 625, lembrando que para a avaliação de seis critérios o número de regras chegaria a 15625. Ainda, se aplicada da forma tradicional – software MATLAB, a única possibilidade de atribuição de prioridades entre os critérios seria a avaliação e atribuição de um peso a cada regra, o que tornaria a aplicação da lógica inviável.

Utilizando então a modelagem 3 como base para algumas comparações entre os resultados finais, podemos chegar as seguintes observações:

- perspectiva REVITA: OTTO como melhor opção na modelagem 3 e modelagem 2 (nesta última, devido a consequência de corte relacionada ao critério custos). Para a modelagem 1, adotada como principal, a MT foi selecionada como melhor opção apresentando uma avaliação global dos critérios de acordo com as preferências dos ADs – observando que um único valor reduzido dentre os critérios importantes, nesta perspectiva para o segundo de maior importância – critério eficiência – não prejudicou a seleção da MT. Deve-se observar que caso houvesse uma meta-regra adicional com consequência de corte para o segundo critério de maior importância, esta tecnologia não seria selecionada.

- perspectiva CONCESSIONÁRIA: MT como melhor opção nas três diferentes modelagens. Embora tenham sido apresentados alguns empates no ranking para as primeiras posições, para a modelagem 1, percebe-se uma unanimidade na seleção da MT.

- perspectiva SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE: MCFC como melhor opção nas três diferentes modelagens. Embora tenham sido apresentados alguns empates às primeiras posições, para as modelagens 1 e 2, percebe-se uma unanimidade na seleção da MCFC, observando que um único valor reduzido dentre os critérios importantes (nesta perspectiva para o segundo de maior importância – critério vida útil) não prejudicou a seleção da MCFC.

- perspectiva REVITA/CONCESSIONÁRIA: MT e sistema OTTO ocupando as duas primeiras posições para as três diferentes modelagens. O resultado é similar a perspectiva REVITA – OTTO como melhor opção nas modelagens 3 e 2 (nesta última, devido a consequência de corte relacionada ao critério custos). Para a modelagem 1, adotada como principal, a MT foi selecionada como melhor opção apresentando uma avaliação global dos critérios de acordo com as preferências dos ADs. Para a modelagem 3 a MCFC foi uma das melhores alternativas, pois nesta modelagem não há qualquer relevância entre os quatro

critério avaliados e, como já citado, um único valor reduzido dentre os critérios importantes não prejudica a seleção da tecnologia.

Para finalizar as comparações entre as modelagens, as diferentes perspectivas foram avaliadas considerando um cenário otimista de geração de biogás – durante 20 anos – e um cenário pessimista de geração de biogás – durante apenas 10 anos. Com os novos dados de entrada ao critério vida útil, foram observadas as seguintes modificações:

- Para modelagem 1 a alteração mais significativa foi verificada na perspectiva SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE, onde a célula SOFC foi selecionada como a melhor opção para o cenário otimista – no cenário inicial de 16 anos de geração a célula MCFC havia sido eleita como melhor opção. Nas demais perspectivas não foram constatadas modificações relevantes.

- Para modelagem 2 não foram constatadas quaisquer modificações relevantes, considerando a extrema importância dada ao critério mais importante pela meta-regra com consequência de corte, sendo que em nenhuma das perspectivas o critério vida útil é o critério de maior relevância.

- Para modelagem 3 a alteração mais significativa foi verificada na perspectiva CONCESSIONÁRIA, onde a célula SOFC foi selecionada como a melhor opção para o cenário otimista junto a MT, que já havia sido eleita como melhor opção no cenário inicial. Na perspectiva REVITA, a célula PAFC foi selecionada como a segunda melhor opção para o cenário otimista. Nas demais perspectivas não foram constatadas modificações relevantes.

Apêndice B - ESTUDO DE CASO PRELIMINAR: SELEÇÃO DE FONTES DE GERAÇÃO DE ENERGIA - MÉTODO AHP E LÓGICA FUZZY

Este apêndice apresenta o Estudo de Caso Preliminar desenvolvido para a seleção inicial do método a ser tomado como base a partir da comparação dos métodos inicialmente selecionados - AHP e lógica fuzzy.

Base teórica - Método AHP

Uma das principais características da metodologia desenvolvida por Saaty é a relação com o modo de tomada de decisão que ocorre no raciocínio humano. Segundo Saaty, a mente humana distribui elementos em grupos de acordo com propriedades, estruturando o raciocínio e a consequente tomada de decisão. Estes agrupamentos podem ser descritos como hierarquias.

No método de Saaty ou método AHP, a partir da formulação destas hierarquias (processo de estruturação) há o estabelecimento de importâncias (pesos), normalmente definidos através de julgamentos verbais e numéricos (processo de julgamento). A definição destes graus de importância se baseia em um processo de comparação por pares que permite avaliar a consistência da decisão para cada nível da hierarquia. Finalmente, a partir do processo matemático proposto, é estabelecida uma ordenação da qualificação de cada alternativa com base em requisitos definidos.

Hierarquias

A hierarquia pode ser construída em vários níveis, sendo fixada a finalidade principal no primeiro nível, a definição dos critérios no segundo nível e assim por diante para os demais sub-critérios (caso necessário). A ordenação serve para dois propósitos: fornecer uma visão global do problema (estudo de caso) e ajudar o agente de decisão a avaliar se os critérios de cada nível (DODGSON et al, 2001), (SCHIMIDT, 1995), (PERELMAN e OLBRECHTS-TYTECA, 2005).

Na construção das hierarquias devem ser incluídos detalhes relevantes para:

- representar o problema de tal modo que inclua todos os elementos importantes para a avaliação;

- considerar o ambiente em questão;
- identificar os critérios que contribuem para a solução;
- identificar os envolvidos ou interessados ao problema.

A construção da hierarquia requer experiência e conhecimento da área em estudo. Um exemplo de hierarquia está ilustrado na Figura 1, a seguir.

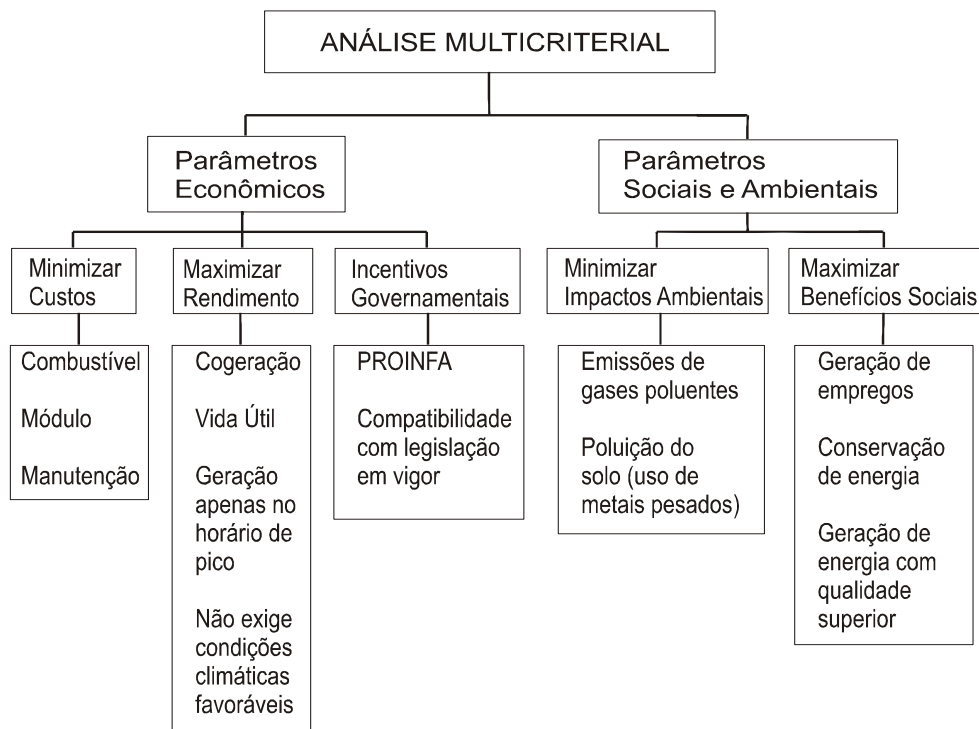


Figura 1 Exemplo de análise multicriterial de forma hierárquica (Fonte: BARIN et al, 2009).

Razão de Consistência

Saaty (1996) propõe o cálculo de um indicador da inconsistência dos julgamentos, denominada Razão de Consistência (C.R. - *Consistency Ratio*). O método AHP faz uso do índice de consistência (C.I.) que evita que as comparações (julgamentos de prioridades) com altos níveis de inconsistência sejam aceitas.

Com o objetivo de medir o desvio de consistência, usa-se a Equação 1:

$$C.I. = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

Onde $\lambda_{max} - n$ é o desvio dos julgamentos em relação a consistência, e sendo n o valor que representa a ordem da matriz.

Seguindo as orientações de Saaty deve-se verificar a coerência dos julgamentos com uma análise do autovalor λ , da matriz de julgamentos (MCP – matrizes de comparação paritária). Caso todos os julgamentos sejam coerentes entre si, o autovalor máximo λ_{max} será igual à ordem da matriz. Segundo Saaty (1991) para matrizes recíprocas positivas λ_{max} pode ser estimado como o produto de um vetor composto pela soma das colunas da matriz de julgamentos pelo autovetor. Por incorporarem a subjetividade, complexidade do julgamento humano, a cada passo, é necessário verificar a validade dos resultados.

De uma forma mais clara, pode-se descrever que os valores de λ_{max} de cada MCP são calculados como segue:

- 1- somam-se os valores das células de cada coluna da MCP;
- 2- o valor de cada uma destas somas é multiplicado pelo valor do peso relativo calculado para cada alternativa em questão;
- 3- os valores destas multiplicações são somados resultando no valor de λ_{max} para esta matriz.

A partir disso, obtém-se λ_{max} e faz-se uso do valor da ordem da matriz n para o cálculo de C.I.. No cálculo final de C.R., um índice aleatório (R.I.) na ordem de n elementos é calculado como média do C.I. para várias matrizes geradas na escala de 1 a 9. Os valores de R.I. destas matrizes podem ser encontrados em Saaty (1996). Por fim, a denominada C.R. pode ser calculada pela razão definida por C.I sobre R.I..

Desta forma, para cada um dos processos descritos acima, calcula-se a Razão de Consistência, observando que segundo Saaty, C.R. deve ser sempre menor que 10 % (0,1) para matrizes com ordem igual ou superior a 5. Esta inconsistência entre os julgamentos serve a princípio como um alerta, sendo a revisão dos julgamentos um procedimento sistemático para a melhoria do processo de tomada de decisão.

Aplicação do método AHP

O AHP caracteriza-se por ter pesos e prioridades obtidas através de um julgamento que pode ser verbal ou numérico. Para a aplicação do método primeiramente tem-se a formulação do objetivo geral no processo hierárquico onde se selecionam os critérios a serem analisados e identificam-se as possíveis alternativas (SHIMIZU, 2001).

A partir disso, são construídas as matrizes de comparação paritária (MCP) para as alternativas e para os critérios (como por exemplo - sistemas de geração e características operacionais, respectivamente). Para o preenchimento da MCP o agente de decisão atribui as prioridades (pesos) de acordo com a Tabela 1, que apresenta os números e as expressões trazidas por Saaty (1991). Os valores da MCP representam a escolha da alternativa da linha versus a alternativa da coluna.

Tabela 1 – Definições estabelecidas por Saaty (Fonte: Saaty, 2006)

| Intensidade da Importância (pesos) | Definição (termos verbais) | Explicação |
|------------------------------------|---|---|
| 1 | Igualmente importante | Dois elementos contribuem igualmente |
| 2 | Fracamente mais importante | - |
| 3 | Moderadamente mais importante | Experiência e julgamento favorecem ligeiramente um elemento |
| 4 | Moderadamente forte mais importante | - |
| 5 | Fortemente mais importante | Experiência e julgamento favorecem fortemente um elemento |
| 6 | Ainda mais fortemente importante | - |
| 7 | Muito Fortemente mais importante ou importância confirmada. | Elemento fortemente favorecido. A dominância de um elemento é provada na prática. |
| 8 | Importância ainda mais confirmada | - |
| 9 | Extremamente mais importante | A evidência favorece um elemento em relação a outro na ordem mais alta possível. |

Basicamente a aplicação do método AHP pode ser dividida em três processos:

Na construção da MCPs das alternativas (Processo 1), calculam-se as prioridades relativas (PR) entre as alternativas considerando separadamente cada um dos critérios. Nesta etapa o agente de decisão avalia as alternativas em pares, considerando um único critério em questão (um por vez). Repete-se esta avaliação até serem analisados todos os critérios envolvidos. Para o cálculo de PR1, no primeiro passo há a divisão de cada valor da MCP pela soma total da coluna a qual este valor pertence. Este processo resulta em uma nova matriz de mesma ordem. No passo seguinte calcula-se a média de cada linha desta matriz resultante (proveniente do primeiro passo), que define o valor de PR1 para cada alternativa analisada.

Na construção da MCP dos critérios (Processo 2), procede-se da mesma forma anterior, desta vez com a finalidade de calcular as prioridades relativas apenas entre os critérios (PR2).

Na última etapa, multiplicam-se os valores das ponderações (prioridades relativas - PR) das alternativas (Processo 1) pela ponderação (PR2) obtida de cada perspectiva (Processo 2). Estas multiplicações originam uma última matriz de mesma ordem da primeira. Os valores de cada linha desta matriz são somados resultando na classificação final das alternativas (Processo 3).

Ainda seguindo as orientações de Saaty, deve-se verificar a coerência dos julgamentos. Resumidamente, deve-se calcular a denominada Razão de Consistência (C.R.) a partir de λ_{max} e de constantes proporcionais à ordem da matriz de julgamentos. Para os processos 1 e 2 descritos acima, calcula-se a Razão de Consistência, observando que segundo Saaty C.R. deve ser menor que 10% (0,1). O estudo descrito por Boas (2006) reuniu várias críticas positivas e negativas ao método AHP, apresentadas a seguir. Ainda, inúmeras outras referências ao uso e aplicação do método AHP podem ser encontradas na literatura demonstrando a sua importância como ferramenta para resolução em problemas de decisão. Desta forma, o uso do método AHP é totalmente justificável, desde que se tenha um conhecimento prévio de suas características e limitações. Como aspectos positivos, podem ser citados:

- simplicidade;
- clareza;
- facilidade de uso;
- habilidade de verificar julgamentos totalmente inconsistentes;
- permite que todos os integrantes do grupo decisor entendam o problema da mesma forma;
- capacidade em lidar com problemas que envolvam variáveis tanto quantitativas como qualitativas;
- resume os resultados dentro de uma lista ordenada que permite a comparação de prioridades e importância relativa de cada fator.

Dentre os aspectos negativos, têm-se:

- subjetividade na formulação da matriz de preferência;
- os critérios representados devem ser independentes ou, pelo menos, suficientemente diferentes, em cada nível;

- a introdução de novas opções pode mudar a posição relativa de algumas das opções originais; ou seja, a inclusão ou exclusão de alguma alternativa externa em um estudo de caso pode modificar a ordenação final de maneira indevida.

- a redundância que o método AHP possui pode também fazer com que o AD realize um número grande de julgamentos;

- o cálculo de consistência dos valores atribuídos durante as comparações par a par evita prováveis erros e desacordos, mas não em 100% dos casos.

Uma das principais críticas feitas ao método AHP por Bana e Vansnick (2001) foi baseada em um problema que ocorre nas escalas do método, após os questionamentos feitos ao agente de decisão. As observações descritas por (Bana e Vansnick, 2001), descritas em detalhes e avaliadas para o estudo de caso preliminar, estão apresentadas no Apêndice C.

Introdução e Dados Iniciais do Estudo de Caso Preliminar

Neste estudo de caso, em particular, supõe-se a avaliação de quatro diferentes alternativas representando diferentes tecnologias de geração de energia. Como resultado final é apresentada uma classificação (ranking) para o uso destes sistemas comparando resultados provenientes da aplicação do método AHP e da lógica fuzzy, considerando duas perspectivas, denominadas custos e meio ambiente. Os critérios selecionados para esta análise são:

- eficiência (EF) em %;
- custo da tecnologia em R\$/MW;
- vida útil (VID) em anos;
- maturidade tecnológica (MAT);
- impactos ambientais (IA) relacionados com impactos visual e biológico, presença de elementos tóxicos e emissões de gases poluentes;
- faixa de potência (FP).

Deve-se observar que neste estudo de caso inicial, os valores quantitativos não foram normalizados, pois ainda não havia uma função padrão definida. Com as devidas análises provenientes destas pesquisas, os critérios qualitativos são representados por pontuações estipuladas na escala de 0 a 1, onde 1 significa a pontuação máxima. Para o estudo de caso preliminar tanto os valores quantitativos como os qualitativos foram definidos pelo autor desta tese; isto é justificável já que o estudo preliminar tem como objetivo, exclusivamente, avaliar e comparar as diferentes metodologias selecionadas fazendo uso de um mesmo conjunto qualquer de dados de entrada.

Para a criação das perspectivas avaliadas neste estudo de caso já é utilizada a etapa de relevância prévia dos critérios. Esta relevância permanece inalterada durante todo o processo de simulação da metodologia, sendo utilizada no método AHP e no uso da lógica fuzzy. A principal finalidade da etapa de relevância neste estudo de caso é contribuir com o agente de decisão, clarificando qual critério possui maior relevância. Ainda, esta etapa possibilita a construção de um conjunto de regras fuzzy reduzido, que pode ser mais facilmente desenvolvido e avaliado.

A relevância dos critérios estabelecida para simulação de cada perspectiva – estudo de caso preliminar – está apresentada a seguir.

- perspectiva custos: 1º custos, 2º maturidade tecnológica, 3º eficiência, 4º vida útil, 5º amplitude de atuação do sistema e 6º impactos ambientais.

- perspectiva meio ambiente: 1º impactos ambientais, 2º eficiência, 3º vida útil, 4º maturidade tecnológica, 5º amplitude de atuação do sistema e 6º custos.

Os dados utilizados para o desenvolvimento da metodologia proposta são apresentados na Tabela 2, considerando os valores utilizados como base para a análise dos critérios quantitativos, e as pontuações atribuídas aos critérios qualitativos.

Tabela 2 – Base de dados utilizado no método AHP e na lógica fuzzy

| Critérios | Sistema 1 | Sistema 2 | Sistema 3 | Sistema 4 |
|------------------------------|---|-----------|-----------|-----------|
| Quantitativos | Valores reais aproximados | | | |
| EF - Eficiência (%) | 15 | 30 | 35 | 45 |
| Custos (R\$ / MW) | 900 | 150 | 200 | 300 |
| VID - Vida útil (anos) | 28 | 23 | 20 | 8 |
| Qualitativos | Pontuações – “1,0 significa maior nota, melhor” | | | |
| MAT - Maturidade tecnológica | 0,60 | 1,0 | 0,70 | 0,80 |
| IA - Impactos ambientais | 0,75 | 1,0 | 0,40 | 0,45 |
| FP – Faixa de Potência | 0,60 | 1,0 | 0,50 | 0,90 |

Aplicação do método AHP – estudo de caso preliminar

Para um melhor entendimento do uso do método AHP, sua aplicação foi dividida em três processos. Na construção da MCPs das alternativas (Processo 1) apresentadas nas Tabela 3 (exemplo numérico) e Tabela 4 (Estudo de Caso Preliminar – análise de todos os critérios),

calculam-se as prioridades relativas (PR1) entre as alternativas considerando separadamente cada um dos critérios. Nesta etapa o agente de decisão avalia as alternativas em pares, considerando um único critério em questão (um por vez). Esta avaliação é realizada a partir do estabelecimento de pesos, por parte do AD, para cada comparação par a par, de acordo com as definições de Saaty (intensidades de importância) apresentadas na Tabela 1.

Esta avaliação (atribuição dos pesos) é repetida até todos os critérios envolvidos terem sido analisados.

Como ilustrado na Tabela 3, para o cálculo de PR1 no primeiro passo há a divisão de cada valor (célula) da MCP pela soma total da coluna a qual este valor pertence. Este processo resulta em uma nova matriz de mesma ordem. No passo seguinte calcula-se a média de cada linha desta matriz resultante (proveniente do primeiro passo), que define o valor de PR1 para cada alternativa analisada.

Tabela 3 – Determinação dos pesos entre as alternativas (processo 1 – exemplo explicativo com a análise do critério 1).

| Definição dos pesos - 1º passo | | | | | Divisão pela soma - 1º passo | | | | | | |
|---------------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|--|----|------|-------------|---------|-----------|----|
| | S1 | S2 | S3 | S4 | | S1 | S2 | S3 | S4 | | |
| S1 | 1,00 | 0,20 | 0,20 | 0,11 | PR | S1 | 1/20 | 0,2/7,2 | 0,2/7,2 | 0,11/1,51 | PR |
| S2 | 5,00 | 1,00 | 1,00 | 0,20 | | S2 | 5/20 | 1,0/7,2 | 1,0/7,2 | 0,20/1,51 | |
| S3 | 5,00 | 1,00 | 1,00 | 0,20 | | S3 | 5/20 | 1,0/7,2 | 1,0/7,2 | 0,20/1,51 | |
| S4 | 9,00 | 5,00 | 5,00 | 1,00 | | S4 | 9/20 | 5,0/7,2 | 5,0/7,2 | 1,00/1,51 | |
| Σ | 20,00 | 7,20 | 7,20 | 1,51 | | | | | | | |
| Resultado da divisão - 1º passo | | | | | Média (linha) - 2º passo | | | | | | |
| | S1 | S2 | S3 | S4 | Média = Σ / n° elementos = | | | PR1 | | | |
| S1 | 0,05 | 0,03 | 0,03 | 0,07 | (0,05 + 0,03 + 0,03 + 0,07)/4 | | | 0,04 | | | |
| S2 | 0,25 | 0,14 | 0,14 | 0,13 | (0,25 + 0,14 + 0,14 + 0,13)/4 | | | 0,17 | | | |
| S3 | 0,25 | 0,14 | 0,14 | 0,13 | (0,25 + 0,14 + 0,14 + 0,13)/4 | | | 0,17 | | | |
| S4 | 0,45 | 0,69 | 0,69 | 0,66 | (0,45 + 0,69 + 0,69 + 0,66)/4 | | | 0,63 | | | |
| Σ | 20,00 | 7,20 | 7,20 | 1,51 | | | | | | | |

Tabela 4 – Determinação dos pesos entre as alternativas (Processo 1).

| Critério 1 – Eficiência (CR = 0,0811) | | | | | | Critério 2 – Custos (CR = 0,0636) | | | | | |
|--|------|------|------|------|-------------|---|------|------|------|------|-------------|
| | S1 | S2 | S3 | S4 | PR1 | | S1 | S2 | S3 | S4 | PR1 |
| S1 | 1,00 | 0,20 | 0,20 | 0,11 | 0,04 | S1 | 1,00 | 0,11 | 0,14 | 0,14 | 0,04 |
| S2 | 5,00 | 1,00 | 1,00 | 0,20 | 0,17 | S2 | 9,00 | 1,00 | 1,00 | 3,00 | 0,40 |
| S3 | 5,00 | 1,00 | 1,00 | 0,20 | 0,17 | S3 | 7,00 | 1,00 | 1,00 | 3,00 | 0,38 |
| S4 | 9,00 | 5,00 | 5,00 | 1,00 | 0,63 | S4 | 7,00 | 0,33 | 0,33 | 1,00 | 0,18 |
| Critério 3 – Maturidade tecnológica (CR = 0,0758) | | | | | | Critério 4 – Impactos ambientais (CR = 0,0661) | | | | | |
| | S1 | S2 | S3 | S4 | PR1 | | S1 | S2 | S3 | S4 | PR1 |
| S1 | 1,00 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,06 | S1 | 1,00 | 0,33 | 5,00 | 3,00 | 0,26 |
| S2 | 5,00 | 1,00 | 3,00 | 1,00 | 0,38 | S2 | 3,00 | 1,00 | 7,00 | 5,00 | 0,56 |
| S3 | 5,00 | 0,33 | 1,00 | 0,33 | 0,18 | S3 | 0,20 | 0,14 | 1,00 | 0,33 | 0,06 |
| S4 | 5,00 | 1,00 | 3,00 | 1,00 | 0,38 | S4 | 0,33 | 0,20 | 3,00 | 1,00 | 0,12 |
| Critério 5 – FP (CR = 0,0037) | | | | | | Critério 6 – Vida útil (CR = 0,0956) | | | | | |
| | S1 | S2 | S3 | S4 | PR1 | | S1 | S2 | S3 | S4 | PR1 |
| S1 | 1,00 | 0,11 | 1,00 | 0,11 | 0,05 | S1 | 1,00 | 3,00 | 5,00 | 9,00 | 0,56 |
| S2 | 9,00 | 1,00 | 7,00 | 1,00 | 0,43 | S2 | 0,33 | 1,00 | 3,00 | 7,00 | 0,27 |
| S3 | 1,00 | 0,14 | 1,00 | 0,11 | 0,05 | S3 | 0,20 | 0,33 | 1,00 | 5,00 | 0,13 |
| S4 | 9,00 | 1,00 | 9,00 | 1,00 | 0,46 | S4 | 0,11 | 0,14 | 0,20 | 1,00 | 0,04 |

Ainda seguindo as orientações de Saaty, verificou-se a coerência dos julgamentos através do cálculo da Razão de Consistência (C.R.), descrito anteriormente na Equação 1. Para os processos 1 e 2, foram calculados os valores de C.R., observando que todos os valores calculados foram menores que 10% (0,1). Estes resultados estão apresentados juntamente com os valores de PR nas Tabelas 4 e 5.

Na construção da MCP dos critérios (Processo 2) apresentada na Tabela 5, procede-se da mesma forma matemática anterior, desta vez com objetivo de calcular as prioridades relativas apenas entre os critérios (PR2), para cada uma das perspectivas em questão.

Tabela 5 – Determinação dos pesos entre os critérios, considerando as perspectivas custos e meio ambiente, respectivamente (Processo 2).

| MCP – Critérios: Perspectiva Custos | | | | | | | MCP – Critérios: Perspectiva Meio Ambiente | | | | | | | | |
|-------------------------------------|------|------|------|------|------|------|--|-----|------|------|------|------|------|------|-------------|
| EF | CT | MAT | IA | FP | VID | PR2 | EF | CT | MAT | IA | FP | VID | PR2 | | |
| EF | 1,00 | 0,20 | 1,00 | 5,00 | 3,00 | 1,00 | 0,13 | EF | 1,00 | 7,00 | 3,00 | 0,33 | 5,00 | 1,00 | 0,19 |
| CT | 5,00 | 1,00 | 3,00 | 9,00 | 7,00 | 3,00 | 0,43 | CT | 0,14 | 1,00 | 0,20 | 0,11 | 0,33 | 0,14 | 0,03 |
| MAT | 1,00 | 0,33 | 1,00 | 7,00 | 5,00 | 3,00 | 0,21 | MAT | 0,33 | 5,00 | 1,00 | 0,20 | 3,00 | 0,20 | 0,09 |
| IA | 0,20 | 0,11 | 0,14 | 1,00 | 0,20 | 0,20 | 0,03 | IA | 3,00 | 9,00 | 5,00 | 1,00 | 9,00 | 3,00 | 0,43 |
| FP | 0,33 | 0,14 | 0,20 | 5,00 | 1,00 | 0,20 | 0,06 | FP | 0,20 | 3,00 | 0,33 | 0,11 | 1,00 | 0,20 | 0,05 |
| VID | 1,00 | 0,33 | 0,33 | 5,00 | 5,00 | 1,00 | 0,14 | VID | 1,00 | 7,00 | 5,00 | 0,33 | 5,00 | 1,00 | 0,22 |
| CR = 0,0970 | | | | | | | CR = 0,0757 | | | | | | | | |

Na última etapa, como ilustrado na Tabela 6, no Processo 3, multiplicam-se os valores das ponderações (PR1) das alternativas (Processo 1) pela ponderação (PR2) obtida para cada critério, considerando separadamente cada perspectiva (Processo 2). Obviamente, estas multiplicações originam uma última matriz de mesma ordem da primeira. Os valores de cada linha (células) desta matriz são somados resultando nas prioridades relativas finais (PRFs). O maior valor encontrado para PRF será a melhor opção, ou seja, estará melhor classificado no ranking final. As PRFs do Estudo de caso preliminar que representam a classificação final das alternativas estão apresentadas nas Tabelas 7 e 8.

Tabela 6 – Determinação dos pesos entre os critérios, considerando a perspectiva custos (Processo 2 – Tabela explicativa)

| | Critério 1 (PR2 = 0,13) | Critério 2 (PR2 = 0,43) | Critério 3 (PR2 = 0,21) | | |
|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------------|-----------------|
| S1 | 0,04*0,13 | 0,04*0,43 | 0,06*0,21 | | |
| S2 | 0,17*0,13 | 0,40*0,43 | 0,38*0,21 | | |
| S3 | 0,17*0,13 | 0,38*0,43 | 0,18*0,21 | | |
| S4 | 0,63*0,13 | 0,18*0,43 | 0,38*0,21 | | |
| Resultado de PR1 x PR2 | | | | Σ (todos critérios) = PRF | CL |
| | Critério 1 | Critério 2 | Critério 3 | | |
| S1 | 0,01 | 0,02 | 0,08 | 0,01 + 0,02 + ... | 0,125 4° |
| S2 | 0,02 | 0,17 | 0,04 | 0,02 + 0,17 + ... | 0,353 1° |
| S3 | 0,02 | 0,16 | 0,02 | 0,02 + 0,16 + ... | 0,246 3° |
| S4 | 0,08 | 0,07 | 0,01 | 0,08 + 0,07 + ... | 0,276 2° |

Nas Tabelas 7 e 8 são calculadas as prioridades relativas finais (PRF) correspondendo à classificação final (CL) das fontes de geração de energia mais apropriadas, considerando as

perspectivas custos e meio ambiente, respectivamente. Tomando como base o artigo descrito por Bana e Vansnick (2008) sobre os problemas encontrados na análise matemática do método AHP, procedeu-se com cada um dos passos observados no artigo, para a validação dos resultados obtidos no estudo de caso preliminar. Estas averiguações podem ser observadas no Apêndice C.

Tabela 7 – Classificação final pelo método AHP - perspectiva custos (Processo 3).

| | Eficiência | Custos | Maturidade | Impacto | Potência | Vida útil | PRF | CL |
|----|------------|--------|------------|---------|----------|-----------|--------------|-----------|
| S1 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,08 | 0,125 | 4° |
| S2 | 0,02 | 0,17 | 0,08 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,353 | 1° |
| S3 | 0,02 | 0,16 | 0,04 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,246 | 3° |
| S4 | 0,08 | 0,07 | 0,08 | 0,00 | 0,03 | 0,01 | 0,276 | 2° |

Tabela 8 – Classificação final pelo método AHP - perspectiva meio ambiente (Processo 3)

| | Eficiência | Custos | Maturidade | Impacto | Potência | Vida útil | PRF | CL |
|----|------------|--------|------------|---------|----------|-----------|--------------|-----------|
| S1 | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,11 | 0,00 | 0,12 | 0,250 | 2° |
| S2 | 0,03 | 0,01 | 0,03 | 0,24 | 0,02 | 0,06 | 0,393 | 1° |
| S3 | 0,03 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,00 | 0,03 | 0,114 | 4° |
| S4 | 0,12 | 0,00 | 0,03 | 0,05 | 0,02 | 0,01 | 0,242 | 3° |

Aplicação da lógica fuzzy – estudo de caso preliminar

Como descrito anteriormente, a metodologia de ajuda a decisão desenvolvida é implementada com o software MATLAB® com regras e conjuntos fuzzy, considerando o mesmo estudo de caso avaliado anteriormente no método AHP. Os valores utilizados para os critérios quantitativos e as pontuações definidas aos critérios qualitativos podem ser observados na Tabela 2. As variáveis fuzzy que caracterizam cada critério estão apresentadas na Figura 2. As regras desenvolvidas nesta etapa tomam como base proposições SE-ENTÃO. Utilizou-se o Método de Mamdani como sistema fuzzy (controlador fuzzy) sendo o Método Máximo dos Mínimos utilizado para inferência e o Método do Centro de Gravidade para a defuzzificação. O tipo e a largura da base de cada função foram definidos considerando as características de cada critério em análise.

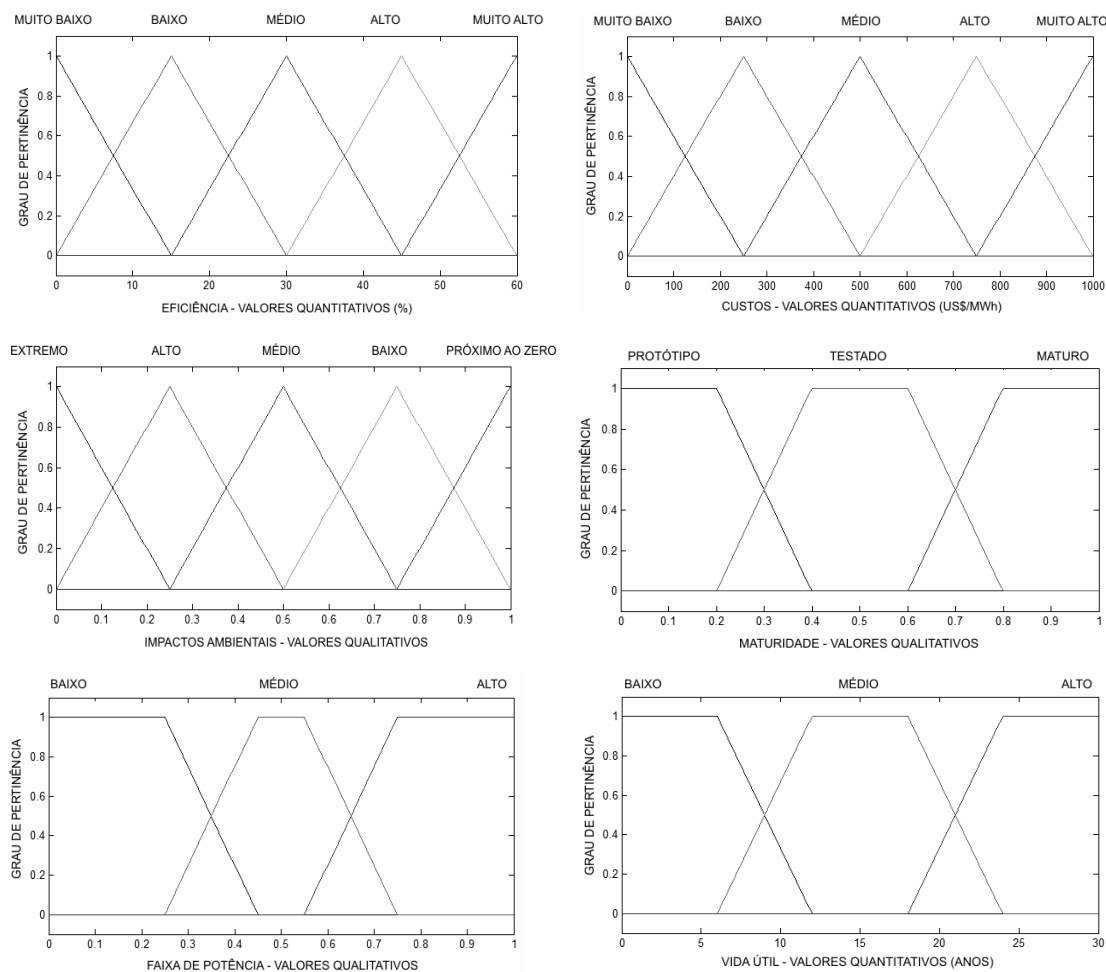


Figura 2 Variáveis Fuzzy para cada critério em análise – estudo de caso preliminar (Fonte: MATLAB®).

A classificação final proveniente da metodologia fuzzy para a identificação da fonte de geração de energia mais apropriada está apresentada na Tabela 9, para as perspectivas custos e meio ambiente.

Tabela 9 – Classificação final pela lógica fuzzy - perspectivas custos e meio ambiente.

| Fontes | PRF - Custos | CL | PRF - Meio Ambiente | CL |
|--------|--------------|----|---------------------|----|
| S1 | 0,090 | 4° | 0,500 | 2° |
| S2 | 0,750 | 1° | 0,750 | 1° |
| S3 | 0,517 | 3° | 0,376 | 4° |
| S4 | 0,676 | 2° | 0,423 | 3° |

Comparação dos resultados: AHP e lógica fuzzy

Nas Tabelas 10 e 11 estão apresentadas as classificações finais das fontes renováveis de energia proveniente das análises multicriteriais aplicadas no método AHP e nos conjuntos e regras fuzzy, considerando as perspectivas custos e meio ambiente, respectivamente.

Tabela 10 – Classificação final na perspectiva custos: método AHP e lógica fuzzy.

| Fontes | AHP | | Fuzzy | |
|--------|-------|----|-------|----|
| | PRF | CL | PRF | CL |
| S1 | 0,125 | 4° | 0,090 | 4° |
| S2 | 0,353 | 1° | 0,750 | 1° |
| S3 | 0,246 | 3° | 0,517 | 3° |
| S4 | 0,276 | 2° | 0,676 | 2° |

Tabela 11 – Classificação final na perspectiva meio ambiente: método AHP e lógica fuzzy.

| Fontes | AHP | | Fuzzy | |
|--------|-------|----|-------|----|
| | PRF | CL | PRF | CL |
| S1 | 0,250 | 2° | 0,500 | 2° |
| S2 | 0,393 | 1° | 0,750 | 1° |
| S3 | 0,114 | 4° | 0,376 | 4° |
| S4 | 0,242 | 3° | 0,423 | 3° |

Observando os resultados acima, percebe-se que a classificação das fontes de geração é exatamente a mesma, tanto na análise com o método AHP quanto no uso da lógica fuzzy.

Estes resultados propiciam uma avaliação positiva da aplicação destes dois métodos para a seleção de fontes de geração de energia. Como apresentado, o sistema S2 foi selecionado como a escolha mais apropriada tanto para a perspectiva custos quanto para a perspectiva meio ambiente. Observando os valores da Tabela 2 é possível verificar que através de uma análise monocriterial o sistema S2 também seria selecionado como a melhor opção para as duas perspectivas em questão. No entanto, algumas das demais classificações com a análise multicriterial, como por exemplo, a segunda posição para S4 na perspectiva custos, contradizem os resultados da análise monocriterial (Tabela 2). Isto demonstra que a partir do uso de técnicas multicriteriais há uma análise mais ampla das características de cada estudo de caso, ponderando todos os critérios envolvidos.

APÊNDICE C - ANÁLISE DOS RESULTADOS DO MÉTODO AHP

Tomando como base o artigo descrito por Bana e Vansnick (2008) sobre os problemas encontrados na análise matemática do método AHP, procedeu-se com cada uma dos passos observados no artigo, considerando a simulação do estudo de caso 1, apresentado acima.

Na primeira análise sobre os problemas verificados por estes autores, há uma comparação das relações baseadas nas definições estabelecidas por Saaty na Tabela 1. A partir dos modelos matemáticos apresentados por Bana e Vansnick (2008) é possível estabelecer quais as relações são mais propícias a inconsistências. Para o Estudo de Caso Preliminar, verificou-se a possibilidade de inconsistências nas relações apresentadas na Tabela 3. Para verificação destas relações, primeiramente é realizada a análise de acordo com os pesos definidos pelos AD e, posteriormente, considera-se as mesmas relações entre as alternativas com os valores dos pesos relativos de cada critério obtidos pelo método AHP. Com estas comparações, foram observadas as seguintes modificações no estudo de caso em análise – Tabela 1, onde: “Antes” representa relação direta entre as alternativas – pesos diretos estipulados na Tabela 4 do Apêndice B; “Depois” representa as divisões entre os valores finais das prioridades relativas PR1 para cada alternativa em questão – valores PR1 apresentados na Tabela 4 Apêndice B.

Conjuntos de Tabelas 1 – Verificações do estudo de caso preliminar para o método AHP: Análise 1.

| CR. MATURIDADE | | Divisão | | |
|----------------|--------|----------------------|--|-------------------------------------|
| S2/S1 | Antes | 5 | $5/5 = 1$ | ANTES |
| | Depois | 0,038/0,06 = 6,12 | | <i>Igualmente importante</i> |
| S3/S1 | Antes | 5 | $6,12/2,88 = 2,12$ (2) | DEPOIS |
| | Depois | 0,018/0,06 = 2,88 | | Fracamente mais importante |

| CR. IMPAC. AMBIENTAIS | | Divisão | | |
|-----------------------|--------|-----------------------|---|----------------------------|
| S2/S3 | Antes | 7 | $7/3 = 2,33 \approx 2$ | ANTES |
| | Depois | 0,056/0,06 = 9,8 | | Fracamente mais importante |
| S2/S1 | Antes | 3 | $9,8/2,11 = 4,62 \approx 5$ | DEPOIS |
| | Depois | 0,056/0,026 = 2,11 | | Fortemente mais importante |

| CR. EFICIÊNCIA | | Divisão | | |
|----------------|------------------|-----------------------|---|-------------------------------------|
| S4/S1 | Antes - NOTA | 9 | $9/5 = 1,8 \approx 2$ | ANTES |
| | Depois - DIVISÃO | 0,063/0,04 = 13,96 | | Fracamente mais importante |
| S3/S1 | Antes | 5 | $13,96/3,68 = 3,78 \approx 4$ | DEPOIS |
| | Depois | 0,017/0,04 = 3,68 | | Moderadamente forte mais importante |

| CR. CUSTOS | | Divisão | | |
|------------|--------|----------------------|--|-------------------------------------|
| S3/S1 | Antes | 7 | $7/7 = 1$ | ANTES |
| | Depois | 0,038/0,04 = 9,25 | | <i>Igualmente importante</i> |
| S4/S1 | Antes | 7 | $9,25/4,26 = 2,17 \approx 2$ | DEPOIS |
| | Depois | 0,018/0,04 = 4,26 | | Fracamente mais importante |

| CR. VIDA ÚTIL | | Divisão | | |
|---------------|--------|-----------------------|---|----------------------------------|
| S1/S4 | Antes | 9 | $9/3 = 3$ | ANTES |
| | Depois | 0,056/0,04 = 13,38 | | Moderadamente mais importante |
| S1/S2 | Antes | 3 | $13,38/2,09 = 6,69 \approx 7$ | DEPOIS |
| | Depois | 0,056/0,027 = 2,09 | | Muito Fortemente mais importante |

Observando os resultados da Tabela 1, pode-se verificar que, para as análises das relações entre as alternativas para estes critérios, na maioria dos casos há pequenas

modificações de julgamento. No entanto, foram observadas variações significativas nas relações para os critérios custos, impactos ambientais e vida útil. Esta é uma comprovação que as relações entre os julgamentos não podem ser sempre garantidas, mesmo com a validação da razão de consistência, que sempre foi mantida dentro do valor máximo definido por Saaty (menor que 0,1). Na verificação do critério faixa de potência não foram observadas alterações nas relações.

A segunda análise descrita por Bana e Vansnick (2008) refere-se ao problema de troca de ordem no ranking das alternativas para cada um dos critérios, considerando primeiramente um ranking dos pesos dados a cada uma das alternativas para cada critério em questão (apresentados na Tabela 4 do Apêndice B). Posteriormente, compara-se este ranking com as prioridades relativas obtidos após a simulação (também apresentadas na Tabela 4 do Apêndice B), relacionando-os da mesma forma como estabelecido nas definições dos pesos. As comparações realizadas para o estudo de caso preliminar encontram-se na Tabela 2, como segue.

Conjuntos de Tabelas 2 – Verificações do estudo de caso preliminar para o método AHP: Análise 2 (critério maturidade)

| PESOS DEFINIDOS – CRITÉRIO MATURIDADE (TABELA 5.3) | | | | | |
|--|---------------------------|-------------------|-----------|--------|-------|
| | S1 | S2 | S3 | S4 | PR1 |
| S1 | 1,00 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,06 |
| S2 | 5,00 | 1,00 | 3,00 | 1,00 | 0,38 |
| S3 | 5,00 | 0,33 | 1,00 | 0,33 | 0,18 |
| S4 | 5,00 | 1,00 | 3,00 | 1,00 | 0,38 |
| PROCESSO COMPARATIVO | | | | | |
| | PR1 | DIVISÕES entre PR | | DEPOIS | ANTES |
| S1 | 0,06 | S1_S4 | 0,06/0,38 | 0,16 | 0,20 |
| S2 | 0,38 | S2_S4 | 0,38/0,38 | 1,00 | 1,00 |
| S3 | 0,18 | S3_S4 | 0,18/0,38 | 0,47 | 0,33 |
| S4 | 0,38 | S1_S3 | 0,06/0,18 | 0,35 | 0,20 |
| | | S2_S3 | 0,38/0,18 | 2,12 | 3,00 |
| | | S1_S2 | 0,06/0,38 | 0,16 | 0,20 |
| CLASSIFICAÇÕES | | | | | |
| C.R. MATURIDADE | Antes (pesos estipuladas) | | Depois | | |
| S1_S4 | 0,20 | 4° | 0,16 | 5° | |
| S2_S4 | 1,00 | 2° | 1,00 | 2° | |
| S3_S4 | 0,33 | 3° | 0,47 | 3° | |
| S1_S3 | 0,20 | 4° | 0,35 | 4° | |
| S2_S3 | 3,00 | 1° | 2,12 | 1° | |
| S1_S2 | 0,20 | 4° | 0,16 | 5° | |

Avaliando os resultados da Tabela 2, considerando a avaliação do critério maturidade, pode-se constatar que houve uma pequena modificação no ranking, comparando o peso inicial atribuído a comparação entre as alternativas “S1_S2” e “S1_S4” com o resultado final pelo método AHP. Para os demais critérios em análise no estudo de caso preliminar, não foram constatadas quaisquer alterações.

A terceira análise exposta por Bana e Vansnick (2008) sugere uma comparação entre o ranking parcial (das prioridades relativas – alternativas para cada critério) e o ranking real com as características reais (ou pontuações no caso dos critérios qualitativos), conforme ilustrado na Tabela 3. Assim, basta uma análise visual direta entre a base de dados utilizada (apresentada na Tabela 2 do Apêndice B) e as prioridades relativas obtidas com o método AHP (apresentadas na Tabela 4 do Apêndice B).

Tabela 3 – Verificações do estudo de caso preliminar para o método AHP: Análise 3.

| CR. EFIC. | Dados reais (%) | Ranking real | PR AHP | Ranking Parcial AHP |
|-----------|-----------------|--------------|--------|---------------------|
| S1 | 15 | 4° | 0,04 | 3° |
| S2 | 30 | 3° | 0,17 | 2° |
| S3 | 35 | 2° | 0,17 | 2° |
| S4 | 45 | 1° | 0,63 | 1° |
| CR. MAT | Pesos | Ranking | PR AHP | Ranking Parcial AHP |
| S1 | 0,5 | 4° | 0,06 | 3° |
| S2 | 0,8 | 1° | 0,38 | 1° |
| S3 | 0,6 | 3° | 0,18 | 2° |
| S4 | 0,7 | 2° | 0,38 | 1° |
| CR. IA | Pesos | Ranking | PR AHP | Ranking Parcial AHP |
| S1 | 0,75 | 3° | 0,26 | 2° |
| S2 | 0,85 | 1° | 0,57 | 1° |
| S3 | 0,40 | 4° | 0,06 | 4° |
| S4 | 0,80 | 2° | 0,12 | 3° |
| CR. FP | Pesos | Ranking | PR AHP | Ranking Parcial AHP |
| S1 | 0,5 | 3° | 0,05 | 3° |
| S2 | 1,0 | 1° | 0,43 | 2° |
| S3 | 0,4 | 4° | 0,05 | 3° |
| S4 | 0,8 | 2° | 0,46 | 1° |

A partir da análise do ranking real e ranking parcial do método AHP apresentados acima, percebe-se que para a avaliação dos critérios quantitativos houve uma alteração de classificação das alternativas S2 e S1, para o critério eficiência. Para os demais critérios quantitativos não foram constatadas quaisquer modificações. Já na avaliação dos critérios

qualitativos foram percebidas alterações nos rankings para os três critérios em questão. Estas falhas, cometidas provavelmente pelo agente de decisão no momento de atribuição dos pesos, são exemplos comuns de inconsistências que podem passar despercebidas no método AHP, principalmente em se tratando de critérios qualitativos onde normalmente há uma significativa dificuldade de quantificação de valores. Estas inconsistências ainda podem acontecer quando os valores reais – dos critérios quantitativos – forem muito próximos, o que dificulta a adequada definição dos pesos. Estes aspectos podem ser avaliados como uma imprecisão do método; imprecisão esta não averiguada pela razão de consistência estabelecida por Saaty.

APÊNDICE D - QUESTIONÁRIO BASE APLICADO AOS AGENTES DE DECISÃO

Antes de apresentar o modelo do questionário base a ser aplicado aos ADs envolvidos no processo decisório em questão, é interessante recordar alguns aspectos sobre a participação dos ADs, pois apenas a intervenção do AD vai permitir chegar a uma conclusão resultante da conjugação das suas preferências ao processo decisório em questão.

A análise dos critérios qualitativos toma como base as pontuações estipuladas pelos agentes de decisão. Para a definição das pontuações finais de forma quantificada, primeiramente os ADs atribuem as pontuações individualmente tomando como base uma escala de 0 a 1,0, onde 1,0 significa a pontuação máxima – intensidade máxima. Em um segundo momento as pontuações são discutidas entre os ADs (se houver mais de um AD para uma mesma avaliação) com intuito de eliminar, ou reduzir, discordâncias muito significativas entre as pontuações dadas por diferentes ADs para um mesmo critério qualitativo. É importante salientar que estas pontuações devem ser definidas por ADs experientes. Mesmo assim, em alguns casos estas pontuações podem ser consideradas subjetivas, havendo a possibilidade de discordâncias entre as pontuações estipuladas por diferentes ADs. A eliminação destas discordâncias é uma etapa fundamental para o não comprometimento dos resultados finais. Apenas depois desta discussão (consenso final) deve ser calculada a média das pontuações parciais dos ADs, resultando nas pontuações finais. Por fim, a análise dos ADs deve ser concebida não apenas de acordo com dados baseados em fontes bibliográficas confiáveis, mas também considerando a realidade local, avaliando as relações entre os critérios analisados juntamente as condições econômicas, sociais e ambientais da região onde prevê-se a instalação do sistema de geração.

No processo decisório analisado neste trabalho de doutorado há um único AD para a avaliação de cada critério e, desta forma, não houve necessidade da etapa de eliminação de discordâncias, bastando o auxílio e verificação dos especialistas.

O modelo do questionário base aplicado aos ADs envolvidos no estudo de caso apresentado nesta tese está apresentado a seguir.

QUESTIONÁRIO APLICADO AOS AGENTES DE DECISÃO ENVOLVIDOS

| | | | | | |
|---|---------------------|---------------------|----|-----|----|
| Empresa do Agente de Decisão | | | | | |
| Formação do Agente de Decisão | | | | | |
| É de conhecimento e comum acordo do AD os critérios que estão sendo avaliados? | | SIM | | NÃO | |
| | | | | | |
| Se não, especifique quais critérios devem ser alterados ou incluídos. | | | | | |
| Qual é o critério que o AD considera ter maior importância? (mais relevante) | | | | | |
| Ordene abaixo todos os critérios conforme a prioridade. (criação da perspectiva de interesse) | | | | | |
| 1° | 2° | 3° | 4° | 5° | 6° |
| É de conhecimento do AD os principais aspectos envolvidos no(s) critério(s) qualitativo(s) que pretende avaliar? | | SIM | | NÃO | |
| | | | | | |
| Se não, especifique quais aspectos devem ser incluídos ou melhor descritos. | | | | | |
| Qual é o critério qualitativo que o AD deseja atribuir as pontuações? | | | | | |
| É de conhecimento e comum acordo do AD as alternativas que estão sendo avaliadas? | | SIM | | NÃO | |
| | | | | | |
| Se não, especifique quais alternativas devem ser alteradas ou incluídas. | | | | | |
| Atribua agora uma pontuação para cada alternativa referente ao(s) critério(s) que está sendo avaliado(s). A pontuação deve ser estipulada de 0 a 1, sendo 1 a pontuação máxima. | | | | | |
| Alternativas | Critério 1: | Critério 2: | | | |
| A1 | PONTUAÇÃO 1 PARA A1 | PONTUAÇÃO 2 PARA A1 | | | |
| A2 | PONTUAÇÃO 1 PARA A2 | PONTUAÇÃO 2 PARA A2 | | | |
| A3 | PONTUAÇÃO 1 PARA A3 | PONTUAÇÃO 2 PARA A3 | | | |
| ... | ... | ... | | | |
| O AD gostaria de fazer alguma alteração nas pontuações estipuladas ou possui questionamentos com relação as notas? | | SIM | | NÃO | |
| | | | | | |
| Se sim, consulte o especialista. | | | | | |
| É de conhecimento do AD sobre a atuação e seleção das meta-regras na metodologia de apoio a decisão? (modelagem proposta) | | SIM | | NÃO | |
| | | | | | |
| Se não, consulte o especialista. | | | | | |

ANEXO A – Conceitualização básica: Lixo e aterros e formação do biogás

Classificação do lixo

A Norma Técnica NBR – 10.004, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2004), define resíduos sólidos "*como sendo aqueles no estado sólido e semi- sólido, que resultam de atividades da comunidade, de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, de serviços, de varrição e agrícola*". Esta norma classifica os resíduos sólidos quanto as suas características de periculosidade, toxicidade, reatividade, dentre outras, em três classes: Classe I (perigosos); Classe II (não-inertes) e Classe III (inertes).

- Resíduos Classe I – Perigoso: aqueles que apresentam periculosidade em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto contagiosas, ou características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e/ou patogenicidade.

- Resíduos Classe II – Não Inerte: são os resíduos que não se enquadram nas Classes I ou Classe III, mas podem ter propriedades de combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.

- Resíduos Classe III – Inertes: qualquer resíduo que, a partir de amostras representativas, segundo a NBR 10.007, e submetidos a um contato estático ou dinâmico com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme testes de solubilidade, segundo a NBR 10.006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se os padrões de aspecto, cor, turbidez e sabor.

Outra classificação caracteriza os resíduos sólidos de acordo com a sua procedência, da seguinte forma:

- lixo urbano: formado por resíduos sólidos em áreas urbanas;
- lixo domiciliar: formado pelos resíduos sólidos de atividades residenciais;
- lixo comercial: formado pelos resíduos sólidos das áreas comerciais;
- lixo público: formado por resíduos sólidos, produto de limpeza pública (areia, papéis, folhagem, poda de árvores).
- lixo especial: formado por resíduos geralmente industriais, merece tratamento, manipulação e transporte especial, como pilhas, baterias, embalagens de agrotóxicos, de combustíveis e de remédios ou de venenos.

- lixo industrial: nem todos os resíduos produzidos por indústria, podem ser designados como lixo industrial. Algumas indústrias do meio urbano produzem resíduos semelhantes ao doméstico; os demais poderão ser enquadrados em lixo especial e ter o mesmo destino.

- lixo de serviço de saúde (RSSS): formado pelos resíduos sólidos de serviços hospitalares, ambulatorias, farmácias. Este tipo de lixo deve ser destinado à incineração.

Classificação dos aterros

Os aterros podem ser classificados conforme a forma de disposição do lixo (Lima, 1995 apud Landim 2008).

Os aterros comuns, ou lixões, são uma forma inadequada de disposição final de resíduos sólidos, que se caracteriza pela simples descarga sobre o solo, sem medidas de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública. Este método de disposição é o mais prejudicial devido aos enormes problemas ambientais, sanitários e sociais que causam, tais como:

- poluição do solo, do ar e da água;
- atração de vetores (mosca doméstica, mosquitos, baratas e roedores);
- geração de maus odores;
- risco de fogo, de deslizamentos e de explosões;
- possibilita o espalhamento de lixo pelo vento e por animais e catadores;
- poluição do solo e das águas superficiais e subterrâneas através do chorume (líquido de cor preto, mal cheiroso e de elevado potencial poluidor produzido pela decomposição da matéria orgânica contida no lixo), comprometendo os recursos hídricos.

Os aterros controlados possuem uma técnica de disposição de resíduos sólidos municipais no solo que busca minimizar os impactos ambientais da disposição a céu aberto. Esse método utiliza alguns princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos, cobrindo-os com uma camada de material inerte na conclusão de cada jornada de trabalho. No entanto, não há a impermeabilização do solo e não é prevista a implantação de sistema de captação de gases e efluentes. Os aterros controlados podem apresentar vários problemas que estão associados aos lixões, apesar de minimizar os impactos ambientais.

Já os aterros sanitários são aqueles executados segundo os critérios e normas de segurança ambiental, legislativa e técnica atendendo os padrões de segurança preestabelecidos. Os aterros sanitários possuem a melhor forma de dispor o lixo sobre o solo, compactando-o com trator, reduzindo-o ao menor volume permissível e recobrando-o com

camada de terra compactada, na frequência necessária, de modo a ocupar a menor área possível. Este método garante a preservação do meio ambiente, a higiene e a saúde pública.

Formação, uso e características do biogás

Segundo Coelho (Coelho, 2001 apud Figueiredo, 2007), a descoberta do biogás foi primeiramente atribuída a Shirley em 1667. No século XIX, Ulysse Grayon realizou a fermentação anaeróbia (decomposição sem presença de oxigênio) de uma mistura de estrume e água, a 35°C, obtendo então 100 litros de gás/m³ de matéria. No ano de 1884, Louis Pasteur considerou que a fermentação anaeróbia poderia dar origem a uma fonte de aquecimento e iluminação. Nas décadas de 50 e 60, Índia e China foram os primeiros países a utilizar o processo de biodigestão, sendo que desenvolveram seus próprios modelos de biodigestores.

O biogás é uma mistura gasosa, produzida naturalmente em meio anaeróbico pela ação de bactérias em matérias orgânicas que são fermentadas dentro de determinados limites de temperatura, teor de umidade e acidez, composta basicamente pelos gases: metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), nitrogênio (N₂), hidrogênio (H₂), oxigênio (O₂) e gás sulfídrico (H₂S). Pelas características dos resíduos sólidos do Brasil, o biogás apresenta elevadas concentrações de metano, acima de 55%, e de dióxido de carbono, acima de 30%. De acordo com a quantidade de metano no biogás seu poder calorífico aumenta, visto que o CO₂ é a forma mais oxidada do carbono não podendo ser queimado. O gás metano possui um potencial de aquecimento cerca de 21 vezes maior que o dióxido de carbono e responsável por aproximadamente 25% do aquecimento global (EPA, 2007).

A geração do gás ocorre através de três fases principais de acordo com as características da vida útil de um aterro (Serpa e Lima, 1984).

1 – Aeróbica: nesta fase os microrganismos aeróbios, ou seja, aqueles que utilizam oxigênio na decomposição de matéria orgânica, dão início à decomposição do lixo. A temperatura fica entre 30°C e 70°C, com um Ph acima de 7,0. Esta fase é relativamente curta (um mês em média), uma vez que a quantidade limitada de oxigênio presente no meio é consumida rapidamente.

2 – Acetogênicas: após a diminuição da quantidade de oxigênio, há a predominância de microrganismos anaeróbios facultativos (que preferencialmente não usam o oxigênio no metabolismo). Esses microrganismos são denominados bactérias acetogênicas (processo de hidrólise). A temperatura fica entre 30°C e 45°C, com um Ph na faixa de 5,2 a 6,5.

3 – Metânica: Nesta etapa, compostos orgânicos formados na fase acetogênica começam a ser consumidos por microrganismos estritamente anaeróbios (favorecidos pelo alto pH). O biogás é gerado nesta fase sendo basicamente composto pelo CH₄ e CO₂, numa proporção de aproximadamente 45-60% e 55-40%, respectivamente. Nesta fase há uma produção quase estável de CH₄, CO₂ e N₂. A temperatura fica entre 22°C e 37°C, com um Ph na faixa de 6,8 a 7,2.

Em se tratando dos fatores que influenciam na formação do biogás, têm-se:

- composição do resíduo: quanto mais facilmente é decomposta a fração orgânica do resíduo, mais acelerada é a taxa de produção de gás no aterro. Resíduos com grande presença de matéria orgânica apresentam maior potencial de produção de gases.

- umidade de constituição do resíduo: em muitos aterros o teor de umidade é o fator mais significativo para a taxa de produção de gás no aterro. Quanto maior o teor de umidade, maior será a taxa de produção de gás. O aumento de geração de biogás ocorre em umidades de 50-60%. Como forma de manter a umidade dos resíduos adequada para atuação dos microrganismos nas estações secas do ano utiliza-se a técnica de recirculação do chorume.

- tamanho das partículas: quanto menor a unidade ou partícula do resíduo disposto, maior é a área da superfície específica. Por essa razão, um aterro que aceita pedaços de resíduo possui uma taxa de decomposição mais rápida e completa do que um aterro que recebe somente resíduos inteiros (maiores).

- idade do resíduo: a geração do biogás num aterro possui duas variáveis dependentes do tempo: tempo de atraso (período que vai da disposição do resíduo até o início da geração do metano) e tempo de conversão (período que vai da disposição do resíduo até o término da geração do metano); devido à idade do aterro, as células mais antigas já atingiram a sua capacidade máxima, e tendem a diminuir a produção.

- Ph: a faixa de Ph ótimo para a maioria das bactérias anaeróbias é 6,7 a 7,5 ou próximo do neutro, ou seja Ph = 7,0 (McBean et al, 1995 apud Duarte, 2006). Dentro da faixa ótima de Ph a produção do metano é maximizada e fora dessa faixa, Ph abaixo de 6 ou acima de 8, a produção de metano fica estritamente limitada.

- temperatura: elevadas temperaturas de gás dentro de um aterro são o resultado da atividade biológica. A faixa ótima de temperatura para geração de biogás é entre 35 e 45°C. As condições de temperatura de um aterro influenciam os tipos de bactérias predominantes e o nível de produção de gás. As máximas temperaturas do aterro frequentemente são alcançadas dentro de 45 dias após a disposição dos resíduos, como um resultado da atividade aeróbia microbiológica.

- disponibilidade de nutrientes e bactérias: excesso de nutrientes como nitrogênio e fósforo e presença de bactérias metanogênicas e acetogênicas aumentam a geração de biogás.
- outros fatores que podem influenciar a taxa de geração de gás são: potencial oxidação-redução, densidade da produção gás, compactação dos resíduos, dimensões do aterro (área e profundidade), operação do aterro, precipitação e infiltração, variação da pressão atmosférica, etc.
- inibidores: metais pesados e ácidos em excesso inibem a produção de gases.

Protocolo de Kyoto e mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL)

A partir de estudos científicos sobre o aumento da temperatura média do planeta, o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (Pnuma) e a Organização Meteorológica Mundial criaram o IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, sigla em inglês). Foram as conclusões dos estudos do IPCC sobre mudanças climáticas que deram apoio científico à *Framework Convention on Climate Changes* (Convenção-Quadro das Nações Unidas Sobre a Mudança do Clima), a qual foi assinada por aproximadamente de 175 países, durante a Rio 92. Com o surgimento dessa convenção, seus países signatários passaram a reunir-se periodicamente para discutir e tentar solucionar o aumento de temperatura do planeta.

Concluindo que a principal causa das mudanças climáticas pelas quais passa o planeta era o aumento da concentração de gases que provocam o efeito estufa, a Conferência das Partes chegou à proposta do Protocolo de Kyoto. Neste protocolo estabeleceu-se uma divisão entre dois grupos de países: os que precisam reduzir suas emissões de poluentes e aqueles que não estão obrigados a tais reduções. O Protocolo de Kyoto foi aprovado em 11 de dezembro de 1997, entrando em vigor em 16 de fevereiro de 2005 e estabelecendo uma meta de 5,2% de redução de emissões de gases de efeito estufa nos países industrializados até 2012. Esta redução equivale a aproximadamente 700 milhões de toneladas de gases por ano. No Protocolo de Kyoto foi criado o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). O foco do MDL era a busca de alternativas de tecnologias limpas (não poluidoras) para a geração de energia, reduzindo as emissões de CO₂ na atmosfera. Esse mecanismo tinha como objetivo permitir que os países menos industrializados atinjam o desenvolvimento sustentável, visando o objetivo final da convenção, que é a redução das emissões de carbono. De outro ponto de vista, países mais industrializados poderiam utilizar as reduções certificadas através da

implantação de projetos de MDL em outros países, para contribuir com parte de seus compromissos quantificados de limitação e redução de emissões.

As reduções das emissões, resultantes de cada projeto de MDL, resultavam nos Certificados de Emissões Reduzidas (CER). Para a emissão dos CER comercializáveis, era necessário o enquadramento da atividade nas regulamentações designadas pela conferência das partes definida no Protocolo de Kyoto. Essas certificações também são conhecidas como créditos de carbono.

"O crédito de carbono é um bônus, é um título. É um compromisso de reduzir a emissão (do gás) ou o direito de poluir. Ele é um compromisso que dá direito a um poluidor de poluir uma determinada cota" (Khalili, 2009).

Cabe destacar que os países em desenvolvimento foram isentos de compromissos quantificados de limitação e redução das emissões de gases poluentes no âmbito do Protocolo de Kyoto, por conta do princípio da responsabilidade comum, porém diferenciada. Comum, porque é de responsabilidade de todos os países o aumento do aquecimento do planeta decorrente de uma maior concentração atmosférica de gases nocivos que, por sua vez, é consequência das atividades econômicas, sobretudo dos setores de energia e transportes. A diferenciação se faz necessária pois os países desenvolvidos começaram a contribuir para uma maior concentração de emissão de gases desde a Revolução Industrial (principalmente a partir de 1840), enquanto os países em desenvolvimento iniciaram sua contribuição mais significativa cem anos depois com sua industrialização.

O Brasil, por ser um país em desenvolvimento e possuir níveis de emissões relativamente baixos, não possuía metas obrigatórias de redução de emissões segundo o Protocolo de Kyoto. Isso fez do MDL uma grande oportunidade para o Brasil, por reduzir suas emissões de poluentes e propiciar a negociação de créditos de carbono com países já desenvolvidos gerando recursos para estimular um processo de sustentabilidade ambiental e social.

O Brasil chegou a ocupar o terceiro lugar no ranking dos países que possuem projetos enviados ao Conselho Executivo do MDL. A maior parte dos projetos foi relacionado ao setor energético (61%), com predomínio da cogeração de energia a partir do bagaço de cana. Diversas usinas brasileiras tiveram projetos aprovados pelo Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT).

É interessante recordar que mesmo perante a nova crise econômica global registrada no fim de 2008, que ocasionou uma redução mundial nos investimentos em fontes alternativas de geração de energia, observa-se ainda que o aproveitamento de fontes renováveis de energia

continua a crescer, tendo esta maior conscientização provinda do estabelecimento do protocolo de Kyoto. Ainda, pode-se observar a mobilização dos principais economias mundiais (países desenvolvidos e em desenvolvimento) para o mantimento, ou ascensão, da redução das emissões dos gases poluentes na Conferência de Copenhagen – 2009.

Por outro lado, ainda há necessidade de avaliar e aplicar novos incentivos a utilização de tais fontes, principalmente, no caso do Brasil, ao aproveitamento de RSU. Durante a conferência de Copenhagen, o governo brasileiro apresentou índices de redução de 36 a 39% de emissões até o ano de 2020 (destes, o maior percentual – 25% – estava relacionado a redução do desmatamento e reflorestamento). Com relação ao uso de fontes renováveis, foi proposta a construção de novas hidrelétricas, correspondente a 3,5%, e apenas 1% dos 39% foi vinculado adoção de novas fontes de energia. Destes insignificantes 1%, estava planejado um aumento nas usinas termoelétricas a cana e um aumento na utilização de aerogeradores. Nada foi citado sobre biogás de dejetos de animais ou sobre o aproveitamento do gás de RSU, ou seja, mais uma vez o biogás foi totalmente negligenciado pelo governo federal (BARIN et al, 2010).

ANEXO B - Lista de publicações

Artigos publicados em Periódicos (completos)

1. BARIN, Alexandre, CANHA, Luciane N., MAGNAGO, Karine. F., ABAIDE, Alzenira R., MACHADO, Ricardo, WOTTRICH, Breno.
Multiple Criteria Analysis for Energy Storage Selection. Energy and Power Engineering vol. 3 (4), pp.557-564, September, 2011. DOI: 10.4236/epe.2011.34069.
2. BARIN, Alexandre, CANHA, Luciane N., MAGNAGO, Karine. F., ABAIDE, Alzenira R.
Seleção de fontes alternativas de geração distribuída utilizando uma análise multicriterial baseada no método AHP e na lógica fuzzy. Periódico científico – Revista da Sociedade Brasileira de Automática, 2010.

Capítulos de Livro publicados (completos)

1. BARIN, Alexandre, CANHA, Luciane N., MAGNAGO, Karine. F., MATOS, Manuel A., WOTTRICH, Breno.
A novel fuzzy-based methodology for biogas fuelled hybrid energy systems decision making. Soft Computing.in Green & Renewable Energy Systems, STUDFUZZ, vol. 269, pp. 183–198, 2011 © Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

ISBN 9783642221750. Disponível em:

<http://www.tsoshop.co.uk/bookstore.asp?FO=1159995&Action=Book&ProductID=9783642221750&From=Subject&TRACKID=002025&CLICKID=003782>

Artigos publicados em Anais de Eventos (completos)

1. BARIN, Alexandre, CANHA, Luciane N., MAGNAGO, Karine. F., ABAIDE, Alzenira R., MARTINS, Luis F. ORLING, Ricardo B.
Funções Multiatributos como Tomada de Decisão para a Análise e Seleção de Fontes de Geração de Energia Elétrica. Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Outubro 23-26, 2011, Florianópolis, SC - Brasil.
2. BARIN, Alexandre, CANHA, Luciane N., MAGNAGO, Karine. F., ABAIDE, Alzenira R., MARTINS, Luis F. ORLING, Ricardo B.
Decision Making Process for Selection of Electrical Energy Technologies in Landfills. Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 2011, Maio 11-13, Malaga – Espanha.
3. BARIN, Alexandre, CANHA, Luciane N., MAGNAGO, Karine. F., ABAIDE, Alzenira R.
A critical analysis of CDM projects concerning sustainability: the use of fuzzy logic for CDM project selection. 7th International Conference on the European Energy Market, 2010, Junho 23-25, Madrid - Espanha.

4. BARIN, Alexandre, CANHA, Luciane N., F., ABAIDE, Alzenira R., MARTINS, F.G.
Análise crítica dos atuais incentivos ao uso de fontes renováveis de energia no cenário energético brasileiro – o caso do biogás. II Fórum Brasileiro de Energia, Abril 27-29, 2010.
5. BARIN, Alexandre, CANHA, Luciane N., MAGNAGO, Karine. F., ABAIDE, Alzenira R.
Gerenciamento de Fontes Alternativas de Geração Distribuída utilizando uma Análise Multicriterial baseada no Método AHP e na Lógica Fuzzy. Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Novembro 22-25, 2009, Recife - Brasil.
6. BARIN, Alexandre, CANHA, Luciane N., MAGNAGO, Karine. F., ABAIDE, Alzenira R.
Selection of Storage Energy technologies in a Power Quality Scenario - The AHP and The Fuzzy Logic. 35th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2009, Porto – Portugal.
7. BARIN, Alexandre, CANHA, Luciane N., MAGNAGO, Karine. F., ABAIDE, Alzenira R.
Fuzzy Multi-Sets and Multi-Rules: Analysis of Hybrid Systems concerning Renewable Sources with Conventional and Flow Batteries. The 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems. Novembro, 8 - 12, 2009, Curitiba, Brasil.
8. BARIN, Alexandre, CANHA, Luciane N., MAGNAGO, Karine. F., ABAIDE, Alzenira R., MACHADO, Ricardo Q
Storage Energy Management with Power Quality Concerns - The Analytic Hierarchy Process and The Fuzzy Logic. COBEP'09 - The 10th Brazilian Power Electronics Conference. Setembro, 2009. Bonito MS – Brasil.
9. BARIN, Alexandre, CANHA, Luciane N., MAGNAGO, Karine. F., ABAIDE, Alzenira R., MACHADO, Ricardo Q
Análise Multicritério de Fontes Renováveis de Energia com Biogás – Conjuntos e Regras Fuzzy. Eighth Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission - CLAGTEE. Outubro, 18-22, 2009. Ubatuba, SP – Brasil.
10. BARIN, Alexandre, CANHA, Luciane N., MAGNAGO, Karine. F., ABAIDE, Alzenira R.
Renewable Hybrid Systems using Biogas Fuzzy Multi-Sets and Fuzzy Multi-Rules. Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2009, Setembro. 22 – 24, 2009. San José, California.
11. BARIN, Alexandre, CANHA, Luciane N., MAGNAGO, Karine. F., ABAIDE, Alzenira R., WOTTRICH, Breno.
Multicriteria Decision Making for Management of Storage Energy Technologies on Renewable Hybrid Systems - The Analytic Hierarchy Process and The Fuzzy Logic. 6th International Conference on the European Energy Market, 2009, Leuven, Bélgica.
12. BARIN, Alexandre, CANHA, Luciane N., MAGNAGO, Karine. F., ABAIDE, Alzenira R., WOTTRICH, Breno.
Multicriteria Analysis of the Operation of Renewable Energy Sources taking as basis the AHP Method and Fuzzy Logic concerning Distributed Generation Systems In: WCEEENG, 2009. ISSN: 2090-0279
13. MAZIERO, Elisandra, BARIN, Alexandre, BAUMHARDT, Edner, ANTOLINI, Adriano, VITA SA, Yuri.
Avaliação de Fontes Renováveis de Energia utilizando uma Análise Muticriterial baseada no Método AHP: AIDIS, 2008, Santiago - Chile.