

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

**SELEÇÃO MULTICRITERIAL DO TIPO DE
MINIGERAÇÃO DISTRIBUÍDA USANDO CASCA DE
ARROZ**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Alexandre Kunkel da Costa

Santa Maria, RS, Brasil

2017

SELEÇÃO MULTICRITERIAL DO TIPO DE MINIGERAÇÃO DISTRIBUÍDA USANDO CASCA DE ARROZ

Alexandre Kunkel da Costa

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de

Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Felix Alberto Farret, PhD.

Santa Maria, RS, Brasil

2017

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo autor.

Costa, Alexandre Kunkel da

SELEÇÃO MULTICRITERIAL DO TIPO DE MINIGERAÇÃO
DISTRIBUÍDA USANDO CASCA DE ARROZ / Alexandre Kunkel da
Costa. – 2017.

141 p. ; 30cm.

Orientador: Felix Alberto Farret, PhD

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria,
Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica, RS, 2017

1. Biomassa. 2. Casca de Arroz 3. Minigeração distribuída 4.
AHP 5. Seleção multicriterial I. Farret, Felix Alberto II. Título.

©2017

Todos os direitos autorais reservados a Alexandre Kunkel da Costa. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço: Avenida Roraima, 1000, Prédio 10, Bairro Camobi, Santa Maria, RS, 97105-900

Endereço Eletrônico: alexandre.kunkel@gmail.com

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

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**SELEÇÃO MULTICRITERIAL DO TIPO DE MINIGERAÇÃO
DISTRIBUÍDA USANDO CASCA DE ARROZ**

elaborada por

Alexandre Kunkel da Costa

como requisito parcial para obtenção do grau de

Mestre em Engenharia Elétrica

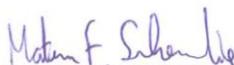
COMISSÃO EXAMINADORA:



Felix Alberto Farret, PhD
(Presidente/Orientador)



Luciane Neves Canha, Dra. (UFSM)



Mateus Felzke Schonardie, Dr. (Unijuí)

Santa Maria, 5 de maio de 2017.

*Dedico este trabalho ao meu pai, **Carlos**, a
minha mãe, **Beti**, ao meu irmão, **Guilherme** e
a minha noiva, **Aniela**.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida, por iluminar os meus passos, proteger o meu caminho e me livrar de todo o mal.

A minha Família: minha fortaleza e meu amuleto da sorte. Agradeço o meu Pai, Carlos Costa, pelos ensinamentos na vida, pelo exemplo de honestidade, responsabilidade, disciplina, coragem, ética, ambição e foco. Agradeço a minha Mãe, Elisabete Kunkel, por acreditar e torcer por mim em todos os momentos da vida, pelo exemplo de determinação, fé, amor, perseverança, compreensão, sabedoria, educação, otimismo e motivação. Agradeço ao meu irmão, Guilherme, pela amizade e companheirismo. Agradeço também a todos os meus avós que sempre estiveram presentes na minha vida e torcendo por mim.

A minha noiva Aniela pela amizade, amor, cumplicidade e respeito, por estar comigo nos momentos bons e ruins, por me dar mais motivação para alcançar os meus/nossos sonhos. Ao meu sogro e sogra, Cesar e Mariza, por terem se tornado a minha segunda família.

Ao Professor Felix Farret, pela oportunidade que me proporcionou, por acreditar em mim e confiar na minha competência para atingir este objetivo, por compartilhar o seu conhecimento, pelo seu envolvimento e orientação na pesquisa.

À Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

À WEG e a todos os meus ex-colegas, principalmente ao meu amigo e gestor do Centro de Negócios de Eficiência Energética, engenheiro Leandro Ávila.

À CORSAN, por me proporcionar a possibilidade de continuar as atividades de pesquisa.

Ao meu amigo, engenheiro Nestor Kunkel, da empresa Tona, como também a toda equipe da empresa Elétrica Meurer.

Aos meus amigos do mestrado, especialmente ao Felipe Carbonera, Douglas Karnikowski, Edenilso Toniello e Felipe Trennepohl, pela troca de experiência e companheirismo nesta e em outras tantas jornadas.

A todos que de alguma forma contribuíram para que alcançasse este tão sonhado objetivo na minha vida.

*“No que diz respeito ao empenho,
ao compromisso,
ao esforço,
à dedicação,
não existe meio termo.
Ou você faz uma coisa bem feita
ou não faz.”*
Ayrton Senna

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

SELEÇÃO MULTICRITERIAL DO TIPO DE MINIGERAÇÃO DISTRIBUÍDA USANDO CASCA DE ARROZ

AUTOR: ALEXANDRE KUNKEL DA COSTA
ORIENTADOR: FELIX ALBERTO FARRET, PHD

Local e Data da defesa: Santa Maria, 5 de maio de 2017.

A crescente ênfase na conservação do meio ambiente associada à dependência de combustíveis fósseis tem estimulado o desenvolvimento e a utilização da biomassa como oferta de energia renovável. Dentre as alternativas bioenergéticas está a casca de arroz, considerada um resíduo agrícola proveniente do processamento deste cereal nas indústrias de beneficiamento. Em virtude da sua produção contínua, como também da característica de baixa densidade, um dos destinos mais usuais da casca de arroz é a compostagem visando à biodegradação. Entretanto essa finalidade desencadeia diversos problemas ambientais, principalmente ligados à emissão de gases poluentes, ocasionados pela lenta decomposição da matéria orgânica. A disponibilidade da casca de arroz nos próprios engenhos potencializa a pesquisa e o projeto para implantação de Geração Distribuída (GD), tendo em vista a possibilidade do aproveitamento energético da biomassa residual para geração de potência elétrica e térmica. Diante destes fatos, esta dissertação tem por objetivo desenvolver uma metodologia multicriterial de apoio à tomada de decisão para seleção do tipo de minigeração distribuída nas indústrias de beneficiamento de arroz. Para alcançar este objetivo foram elaboradas todas as etapas do processo decisório, que incluem: a modelagem para estimar o potencial energético residual, correspondendo à capacidade de geração; a incorporação dos atores; o estabelecimento dos critérios qualitativos e quantitativos das possíveis alternativas tecnológicas; a construção e estruturação do modelo; a aplicação do método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) para classificação em ordem de prioridade das alternativas e a seleção do tipo de minigeração distribuída. Finalmente, para validação da metodologia, foi proposto um estudo de caso em uma indústria de beneficiamento de arroz, com capacidade de minigeração distribuída de 5 MW.

Palavras-chave: Biomassa. Casca de Arroz. Minigeração distribuída. AHP. Seleção multicriterial.

ABSTRACT

Master Thesis
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Santa Maria

MULTICRITERIAL SELECTION FOR DISTRIBUTED MINIGENERATION USING RICE HUSK

AUTHOR: ALEXANDRE KUNKEL DA COSTA
ADVISOR: FELIX ALBERTO FARRET, PHD

Place and Date: Santa Maria, May 5th, 2017.

The growing emphasis on conserving the environment associated with dependence on fossil fuels has stimulated the development and use of biomass as a source of renewable energy. Among the bioenergy alternatives is the rice husk, considered a solid agricultural residue from the processing of this cereal. Due to its continuous production, as well as the characteristic of low density, one of the most usual destinations of rice husk is composting for biodegradation. However, this purpose triggers several environmental problems, mainly related to the emission of polluting gases, caused by the slow decomposition of organic matter. The availability of rice husk in the mills itself boosts the research and the project to implement Distributed Generation (GD), with a view to the energetic use of biomass for electric and thermal power generation. In face of these facts, this thesis aims to develop a multicriterial methodology to support decision making to select the type of distributed minigeration in the rice processing industries. To achieve this objective, all stages of the decision making process are elaborated, including: modeling to estimate residual energy potential, corresponding to generation capacity; incorporation of the actors; establishment of qualitative and quantitative criteria for possible technological alternatives; construction and structuring of the model; application of the Analytic Hierarchy Process (AHP) method to rank in order of priority of the alternatives and the selection of the type of distributed minigeration. Finally, for the heuristic validation of the methodology, the case study was proposed in a rice processing industry, for distributed minigeration of 5 MW.

Keywords: Biomass. Rice husk. Distributed Generation. AHP. Multicriterial selection.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Capacidade instalada de energia elétrica por fonte em 2016.....	34
Figura 2.2 – Evolução da capacidade instalada de energia elétrica por fonte entre 1974 e 2014	35
Figura 2.3 – Capacidade instalada de energia elétrica de acordo com a origem da biomassa .	38
Figura 2.4 – Crescimento da capacidade instalada de energia elétrica proveniente da biomassa	38
Figura 2.5 – Projeção de produção, consumo e importação de arroz até 2025	39
Figura 2.6 – Processos para transformação energética da casca de arroz	41
Figura 2.7 – Rotas tecnológicas para geração de energia elétrica por meio da casca de arroz	46
Figura 2.8 – Cogeração a ciclo Rankine montante.....	53
Figura 2.9 – Cogeração a ciclo Brayton montante	53
Figura 2.10 – Cogeração a ciclo combinado	54
Figura 2.11 – Cogeração a ciclo Diesel.....	54
Figura 2.12 – Cogeração a ciclo Rankine jusante	55
Figura 2.13 – Modelo contemplando as fases e as variáveis de um processo decisório	62
Figura 3.1 – Fluxograma do planejamento de pesquisa	74
Figura 3.2 – Principais aspectos envolvidos no processo decisório em questão.....	76
Figura 3.3 – Etapas da construção do modelo	78
Figura 3.4 – A estruturação do problema por meio de hierarquia.....	86
Figura 4.1 – Distribuição do produto final e dos subprodutos na indústria em 2015.....	94
Figura 4.2 – Resultado das prioridades relativas segundo o critério eficiência elétrica.....	105
Figura 4.3 – Resultado das prioridades relativas segundo o critério eficiência térmica	105
Figura 4.4 – Resultado das prioridades relativas segundo o critério fator de utilização de energia	105
Figura 4.5 – Resultado das prioridades relativas segundo o critério vida útil.....	106
Figura 4.6 – Resultado das prioridades relativas segundo o critério custo de instalação.....	106
Figura 4.7 – Resultado das prioridades relativas segundo o critério custo de operação e manutenção	106
Figura 4.8 – Resultado das prioridades relativas segundo o critério capacidade de geração .	107
Figura 4.9 – Resultado das prioridades relativas segundo o critério acesso à tecnologia	107
Figura 4.10 – Resultado das prioridades relativas segundo o critério comercialização de subproduto	108
Figura 4.11 – Resultado das prioridades relativas segundo o critério comercialização de créditos de carbono.....	108
Figura 4.12 – Resultado das prioridades relativas segundo o critério comercialização de créditos de carbono.....	108

Figura 4.13 – Resultado das prioridades relativas segundo o critério impactos sociambientais	108
Figura 4.14 – Resultado das prioridades relativas segundo a avaliação das alternativas na ótica do Cenário 1	111
Figura 4.15 – Resultado das prioridades relativas segundo a avaliação das alternativas na ótica do Cenário 2	111
Figura 4.16 – Resultado final do Cenário 1	112
Figura 4.17 – Resultado final do Cenário 2	112

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 2.1– Capacidade instalada de energia elétrica de acordo com o biocombustível.....	37
Tabela 2.2 – Capacidade instalada de energia elétrica de acordo com o biocombustível.....	42
Tabela 2.3 – Número de usinas enquadradas como cogeração qualificada.....	56
Tabela 3.1 – Identificação dos atores do processo decisório.....	82
Tabela 3.2 – Identificação dos critérios do processo decisório	83
Tabela 3.3 – Escala numérica para comparação e julgamentos	88
Tabela 3.4 – Índice de consistência em relação ao número de critérios comparados	90
Tabela 4.1 – Distribuição da geração da biomassa residual em 2015	95
Tabela 4.2 – Distribuição do consumo de energia, demanda e fator de carga em 2015	97
Tabela 4.3 – Resumo de informações levantadas e potencial bioenergético.....	97
Tabela 4.4 – Base de dados de critérios quantitativos.....	99
Tabela 4.5 – Base de dados de critérios qualitativos.....	100
Tabela 4.6 – Determinação do peso entre as alternativas.....	102
Tabela 4.7 – Determinação do peso entre os critérios.....	109
Tabela 4.8 – Matriz resultante do Cenário 1 e Cenário 2.....	110
Tabela 4.9 – Classificação final conforme a ótica dos cenários.....	112

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AD	– Agente de Decisão
AHP	– <i>Analytic Hierarch Process</i>
AMD	– Apoio Multicritério à Decisão
ANEEL	– Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	– <i>Analytic Network Process</i>
APE	– Autoprodutor de Energia
AT	– Acesso à tecnologia
BEN	– Balanço Energético Nacional
CBM	– Cogeração com ciclo Brayton montante
CC	– Comercialização de Créditos de Carbono
CCC	– Cogeração com Ciclo Combinado
CER	– Certificados de Emissão Reduzidas
CG	– Capacidade de Geração
CGH	– Centrais Geradoras Hidrelétricas
CH ₄	– Metano
CI	– Custo de Instalação
CIGRE	– <i>Council on Large Electric Systems</i>
CL	– Classificação Final
CO	– Monóxido de Carbono
CO ₂	– Dióxido de Carbono
CONAB	– Companhia Nacional de Abastecimento
CRM	– Cogeração com ciclo Rankine montante
CS	– Comercialização de Subproduto
EE	– Eficiência Elétrica
ET	– Eficiência Térmica
ELECTRE	– <i>Elimination Et Choix Traduisant la Réalité</i>
EOL	– Centrais Geradoras Eólicas
EPE	– Empresa de Pesquisa Energética
FAO	– <i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i>
FU	– Fator de Utilização da Indústria
FUE	– Fator de Utilização de Energia
GCC	– Geração com Células a Combustível
GEE	– Gases do Efeito Estufa
GD	– Geração Distribuída
GMS	– Geração com Motor Stirling
GMT	– Geração com Microturbina
GRA	– Análise Relacional Gray
GTG	– Geração com Turbina a gás
GTV	– Geração com Turbina a Vapor

IC	– Índice de Consistência
IEEE	– <i>Institute of Electrical and Eletronics Engineers</i>
IR	– Índice Aleatório de Consistência
MACBTEH	– <i>Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique</i>
MAL	– Modelo Aditivo Linear
MAPA	– Ministério de Agricultura Pecuária e Abastecimento
MAUT	– <i>Multi-Attribute Utility Theory</i>
MAVT	– <i>Multi-Attribute Value Theory</i>
MCA	– Motor de Combustão Alternativo
MCP	– Matriz de Comparação Paritária
MCT	– Microcentral Térmica
MCFC	– <i>Molten Carbonate Fuel Cells</i>
MDL	– Macanismo de Desenvolvimento Limpo
NAIADE	– <i>Novel Approach to Imprecise Assessment and Decision Environment</i>
NO _x	– Óxido de Nitrogênio
O&M	– Custo de Operação e Manutenção
ONS	– Operador Nacional do Sistema Elétrico
PAFC	– <i>Phosphoric Acid Fuel Cells</i>
PCH	– Pequenas Centrais Hidrelétricas
PCI	– Poder Calorífico Inferior
PDE	– Plano Decenal de Expansão de Energia
PIE	– Produtor Independente de Energia
PR	– Prioridade Relativa
PRF	– Prioridade Relativa Final
PROINFA	– Programa de Incentivo as Fontes Alternativas de Energia
PROMETHEE	– <i>Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation</i>
RC	– Razão de Consistência
REN	– Resolução Normativa
RNA	– Redes Neurais Artificiais
RSU	– Resíduos Sólidos Urbanos
SA	– Impactos socioambientais
SIN	– Sistema Interligado Nacional
SMARTS	– <i>Simple Multiattribute Rating Technique</i>
SO ₂	– Dióxido de Enxofre
SOFC	– <i>Solid Oxide Fuel Cells</i>
TIR	– Taxa Interna de Retorno
TOPSIS	– <i>The Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution</i>
TUSD	– Tarifa do Uso do Sistema de Distribuição

TUST	– Tarifa do Uso do Sistema de Transmissão
UFV	– Usinas Fotovoltaicas
UHE	– Usinas Hidrelétricas
UTE	– Usinas Termelétricas
UTN	– Usinas Termonucleares
VU	– Vida Útil

LISTA DE UNIDADES E VARIÁVEIS

CE	–	Capacidade Bioenergética Residual
GW	–	Gigawatt
h	–	Horas
kcal	–	Quilocaloria
kcal · kg ⁻¹	–	Quilocaloria por quilograma
kg	–	Quilograma
kW	–	Quilowatt
kWh	–	Quilowatt-hora
MC	–	Montante de Casca Acumulado
MW	–	Megawatt
MWh	–	Megawatt-hora
Pe	–	Potencial elétrico de geração
Pt	–	Potencial térmico de geração
RO	–	Regime operacional
TWh	–	Tera watt-hora
w_k	–	Peso do critério k
η_l	–	Rendimento elétrico
η_l	–	Rendimento térmico

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	27
1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA	29
1.2 OBJETIVOS	30
1.2.1 Objetivo geral	30
1.2.2 Objetivos específicos	30
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	31
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	33
2.1 CASCA DE ARROZ PARA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	33
2.1.1 Inserção de energias renováveis na matriz energética nacional	33
2.1.2 Biomassa como alternativa energética	36
2.1.2.1 <i>Disposição e potencial da casca de arroz</i>	39
2.1.3 Geração distribuída	43
2.1.3.1 <i>Políticas e programas de desenvolvimento da geração distribuída</i>	44
2.1.4 Tecnologias para geração distribuída	45
2.1.4.1 <i>Turbina a Vapor</i>	46
2.1.4.2 <i>Turbina a gás</i>	48
2.1.4.3 <i>Microturbinas</i>	48
2.1.4.4 <i>Motor de combustão alternativo</i>	49
2.1.4.5 <i>Motor Stirling</i>	50
2.1.4.6 <i>Célula a combustível</i>	51
2.1.5 Tecnologias para cogeração de energia	51
2.1.6 Estado da arte – geração distribuída proveniente da casca de arroz	57
2.2 APOIO À DECISÃO MULTICRITERIAL	60
2.2.1 Introdução ao processo decisório	60
2.2.2 Métodos multicriteriais de apoio à decisão	63
2.2.3 Estado da arte – utilização de métodos multicriteriais para seleção de sistemas de geração distribuída	66
2.3 RESUMO DO CAPÍTULO	70
3. METODOLOGIA PROPOSTA	73
3.1 PLANEJAMENTO DE PESQUISA	73
3.2 PROBLEMA DECISÓRIO	75
3.2.1 Identificação e caracterização do problema decisório	75

3.2.2 Construção do modelo	77
3.3 ESTRUTURAÇÃO DO MODELO	78
3.3.1 Potencial de geração	79
3.3.2 Identificação dos atores	81
3.3.3 Critérios	82
3.3.4 Alternativas tecnológicas	85
3.3.5 Estruturação do problema	86
3.4 DECISÃO MULTICRITERIAL	86
3.4.1 Método <i>Analytic Hierarchy Process</i> (AHP)	87
3.5 RESUMO DO CAPÍTULO	91
4. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA – ESTUDO DE CASO	93
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	93
4.2 QUANTIFICAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO	94
4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS ALTERNATIVAS	98
4.4 DEFINIÇÃO DOS PESOS	101
4.5 APLICAÇÃO DO MÉTODO MULTICRITERIAL	101
4.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS	111
4.7 RESUMO DO CAPÍTULO	114
5. CONCLUSÃO	115
5.1 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES	117
5.2 SUGESTÕES DE CONTINUIDADE	117
5.3 PUBLICAÇÕES RELACIONADAS AO TRABALHO	119
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121
APÊNDICE A – RESOLUÇÃO NORMATIVA N° 21 DA ANEEL	131
APÊNDICE B – LEVANTAMENTO DE DADOS: ESTUDO DE CASO	133
APÊNDICE C – FORMULÁRIO PARA AGENTE DE DECISÃO	135

1. INTRODUÇÃO

A crescente ênfase na conservação do meio ambiente, especialmente ligada à minimização dos impactos causados pela atividade humana e a dependência dos combustíveis fósseis têm estimulado a utilização da biomassa como fonte de energia renovável. Por outro lado, com o atual descompasso entre o aumento da demanda e oferta de recursos no setor elétrico, tem sido cada vez mais expressiva a pesquisa e o desenvolvimento de novas formas de Geração Distribuída (GD) utilizando biocombustíveis. A inserção da GD por meio de fontes bioenergéticas apresenta-se como uma alternativa estratégica para aperfeiçoar o desempenho do sistema elétrico, sobretudo em decorrência de benefícios agregados, tais como: diversificação da matriz energética, baixo impacto ambiental, menor tempo de implantação, aumento da confiabilidade do sistema elétrico, possibilidade de operar de forma ilhada, redução de perdas em função do menor carregamento dos condutores e melhoria dos níveis de tensão.

No contexto da geração de eletricidade, a participação da biomassa na matriz energética brasileira evoluiu cerca de quatro vezes nos últimos dez anos, representando atualmente 8,8% da capacidade instalada (ANEEL, 2016). Ademais, está prevista a expansão desta fonte de geração em mais de 50% até 2024, o que evidencia a sua potencialidade e importância na complementaridade de geração de potência elétrica. (EPE, 2015).

Dentre as alternativas bioenergéticas de aproveitamento elétrico está a casca de arroz, considerada um resíduo agrícola sólido proveniente do processamento e beneficiamento deste cereal. O Brasil é o nono maior produtor de arroz do mundo, e o maior fora do continente asiático, tendo colhido na safra de 2015 cerca de 12,4 milhões de toneladas (CONAB, 2016). Ainda, projeta-se para os próximos dez anos uma produção nacional com crescimento de 7,2% (MAPA, 2015). Devido à caracterização da produção contínua por parte das indústrias de beneficiamento e a baixa densidade da casca de arroz, um dos destinos mais usuais deste resíduo é a compostagem visando à redução da matéria orgânica. Entretanto, essa finalidade

desencadeia diversos problemas ambientais, principalmente ligados à emissão de gases poluentes devido à lenta decomposição da matéria orgânica (ALMEIDA, 2010). Apenas no Rio Grande do Sul, estado que detém 68% da produção brasileira de arroz e que gera anualmente 1,68 milhões de toneladas de resíduos, estima-se um potencial de geração de potência elétrica de 80 MW, de acordo com Mayer e Hoffmann (2014), o que representaria um índice 75% superior à capacidade instalada no Brasil por meio desta biomassa.

A disponibilidade da casca de arroz nas próprias indústrias de beneficiamento potencializa a pesquisa e o projeto para implantação de empreendimentos voltados à GD, tendo em vista o aproveitamento energético da biomassa residual para fornecimento de potência elétrica, como também da potência térmica. Tais iniciativas, que podem conjugar o interesse público e privado, contribuem para a redução de emissão de poluentes, geração de empregos, incentivos para o desenvolvimento e uso de energia renovável, ou seja, convergem à criação de um vetor para promover o desenvolvimento sustentável. Ainda assim, é válido ressaltar a complexidade e o contínuo debate a cerca de metodologias para se medir o grau de desenvolvimento e consequente seleção de projetos voltados a esse prol.

A natureza multidimensional do modelo sustentável, ligada aos âmbitos sociais, ambientais e econômicos, ora conflitantes, torna o planejamento e a tomada de decisão para seleção do tipo de geração uma tarefa complexa. Diante do exposto, fica evidente a necessidade de promover a análise e o gerenciamento dos critérios a fim de encontrar a alternativa mais apropriada. Estes mecanismos fazem uso de métodos multicriteriais para auxílio à tomada de decisão, frente a um conjunto de subcritérios previamente estabelecidos e cenários que incorporam as preferências do agente de decisão, ponderando também a avaliação das partes interessadas (denominados *stakeholders*). Desta forma, a priorização da escolha remete à alternativa mais satisfatória e harmoniosa, frente à avaliação global.

Mediante estes fatos, o presente trabalho tem a finalidade de desenvolver uma metodologia de auxílio à tomada de decisão baseada em uma análise multicriterial para seleção do tipo de minigeração distribuída utilizando a casca de arroz. Para alcançar este objetivo são elaboradas todas as etapas do processo decisório, que incluem: a modelagem para estimar o potencial energético residual, correspondendo à capacidade de geração; a incorporação dos atores; o estabelecimento dos critérios qualitativos e quantitativos frente às possíveis alternativas tecnológicas; a construção e estruturação do modelo; e a aplicação do método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) para classificação em ordem de prioridade das

alternativas e seleção do tipo de minigeração distribuída. Finalmente, para validação da metodologia, foi proposto o estudo de caso em uma indústria de beneficiamento de arroz.

1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Atualmente, a casca de arroz é considerada o subproduto de maior expressividade gerado pelas indústrias de beneficiamento de arroz. Estima-se que até 30% do volume de casca produzido pelos engenhos já é utilizado como vetor energético para fornecer potência térmica aos processos de secagem e parboilização de arroz (MAYER, 2009). Por sua vez, o restante da biomassa residual é transportado aos aterros para que ocorra a biodegradação. Tendo em vista que a casca de arroz representa, em média, 20% da massa do grão (FOLETTO et al., 2005), conclui-se que para cada tonelada de arroz bruto processado, há disponibilidade de 140 kg de biomassa para GD. Diante dos fatos, em âmbito nacional, é possível constatar um potencial de expansão de energia renovável através da casca de arroz na ordem de 75% (MAYER e HOFFMANN, 2014).

Além disso, o aproveitamento da casca de arroz para geração distribuída pode minimizar os impactos ambientais decorrentes da lenta decomposição da biomassa no meio ambiente. Dentre os principais benefícios ambientais estão a mitigação da emissão de gases do efeito estufa e a redução da contaminação do solo.

Já em âmbito local, os fatores que impulsionam a viabilidade econômica de GD nas indústrias de beneficiamento estão relacionados à minimização dos custos operacionais, principalmente ligados aos insumos energéticos (eletricidade e calor) e transporte. Outrossim, há possibilidade de se obter novas receitas, vinculadas à comercialização da casca de arroz carbonizada, aos créditos de carbono e à geração de energia elétrica excedente. Todas essas questões contribuem de uma forma geral o desenvolvimento sustentável do setor orizícola.

Com relação à seleção do tipo de geração distribuída, muito embora as tomadas de decisões sejam decorrentes das avaliações e análises econômicas, não devem ser desconsideradas as questões de ordem social e ambiental. Por isso mesmo, muitos autores já referenciam a utilização de métodos multicriteriais para promover o gerenciamento dos critérios e tomar a decisão que atenda a um consenso global.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver uma metodologia multicriterial para seleção do tipo de minigeração distribuída utilizando o aproveitamento bioenergético da casca de arroz. Desta forma, o principal objetivo constitui-se em encontrar a alternativa mais apropriada para geração de potência elétrica, considerando critérios de origem técnica, econômica, socioambiental. Ademais, buscou-se estabelecer a modelagem matemática para avaliar preliminarmente o potencial energético em virtude da disponibilidade de biomassa residual. Através da criação desta metodologia genérica é possível obter soluções destinadas às indústrias do segmento orizícola de diferentes portes, além de facilitar o entendimento do processo decisório e auxiliar o agente na tomada de decisão.

1.2.2 Objetivos específicos

- 1) Apresentar o estado da arte sobre geração de energia elétrica, cogeração de energia e GD utilizando a casca de arroz, através dos processos de transformação da biomassa e das rotas tecnológicas de geração. Da mesma forma, visa-se apresentar os métodos multicriteriais de apoio à tomada de decisão, voltados para a seleção do tipo de geração distribuída. Para isso são revisados os principais critérios e métodos de análise relacionados aos indicadores sustentáveis de empreendimentos.
- 2) Desenvolver a modelagem matemática destinada à verificação do potencial bioenergético de casca de arroz para geração de potência elétrica e térmica.
- 3) Construir e estruturar um modelo genérico que incorpore os atores do processo decisório, os critérios de avaliação e as possíveis alternativas para geração.
- 4) Aplicar o método AHP para seleção do tipo de minigeração distribuída.
- 5) Incorporar à dissertação o estudo de caso em uma indústria de beneficiamento de arroz, visando à verificação e validação do modelo. Para obtenção do potencial de geração, aplica-se um questionário específico com o propósito de obter os dados técnicos de produção. Além disso, cria-se um cenário para aplicação do método assim desenvolvido, baseado na avaliação e interesse do agente de decisão. Tais informações também são obtidas através de um questionário.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho está organizado em cinco capítulos e três apêndices. No Capítulo 1 é apresentada uma visão geral sobre esta dissertação, descrevendo introdutoriamente as questões relativas ao tema desta pesquisa e seu objetivo.

Já o Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica e o estado da arte sobre geração distribuída proveniente da utilização da casca de arroz. Da mesma forma, descreve as principais metodologias multicriteriais existentes e sua empregabilidade na seleção do tipo de geração distribuída.

Por sua vez, o Capítulo 3 detalha o planejamento da pesquisa e a metodologia proposta, contemplando a caracterização do processo decisório em questão. Assim sendo, é construído o modelo e descritas as etapas de estruturação do problema referentes ao potencial de geração, à identificação dos atores, aos critérios qualitativos e quantitativos das alternativas tecnológica, bem como ao detalhamento da técnica multicriterial escolhida.

O Capítulo 4 contempla a aplicação da metodologia através de um estudo de caso em uma indústria de beneficiamento de arroz. Tal modelo tem o intuito de selecionar o tipo de minigeração distribuída. Por fim, são apresentados os resultados finais do estudo de caso.

Finalmente, no Capítulo 5 é feita uma conclusão sobre os resultados alcançados, como também as contribuições da dissertação, as recomendações de melhoria e trabalhos futuros a cerca do tema de pesquisa.

O Apêndice A ilustra a Resolução Normativa Nº 21 da ANEEL. Já o Apêndice B e o Apêndice C apresentam o formulário usado para levantamento de dados do estudo de caso e o questionário submetido ao agente de decisão para estabelecimento do cenário, respectivamente.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CASCA DE ARROZ PARA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Esta seção tem por objetivo apresentar uma revisão bibliográfica sobre o uso da casca de arroz para geração de potência elétrica. A mesma foi dividida em seis partes, destacando: a atual matriz energética nacional e a utilização de fontes renováveis; a inserção da biomassa como alternativa energética, dando ênfase à disposição e potencialidade da casca de arroz; a geração distribuída e as principais políticas públicas de incentivo; as tecnologias associadas à geração de energia elétrica e cogeração proveniente da casca de arroz.

2.1.1 Inserção de energias renováveis na matriz energética nacional

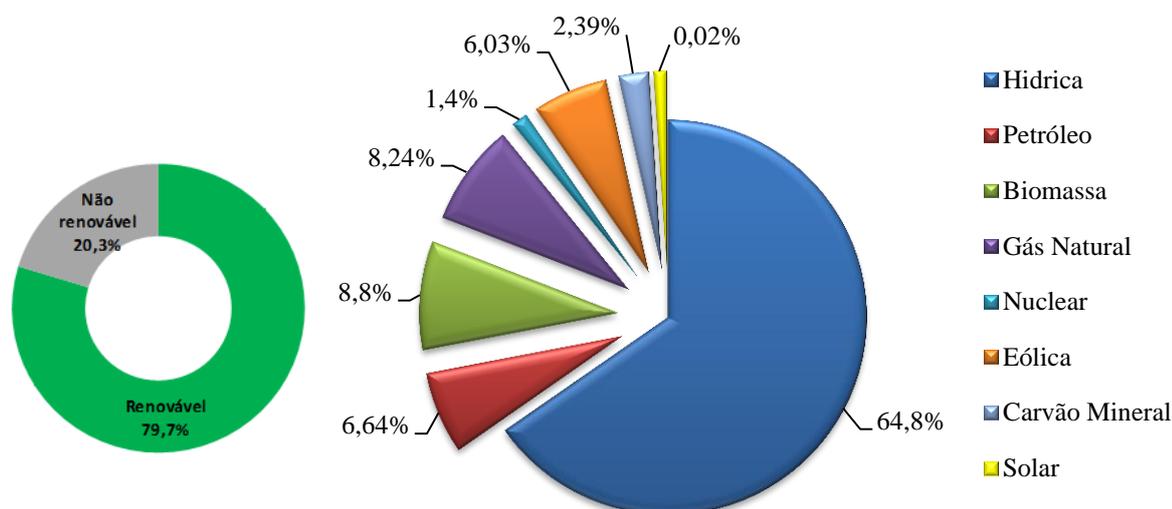
Em escala global, o debate acerca da necessidade de utilização de fontes renováveis de geração de energia começou a partir dos anos 1990, muito em função do desenvolvimento de estudos científicos sobre os impactos causados no meio ambiente pela emissão de gases do efeito estufa à atmosfera, ocasionando as mudanças climáticas e o aquecimento global, além da previsão da escassez de combustíveis fósseis (REIS et al., 2012). Paralelamente, buscaram-se novas fontes de geração e o aumento da eficiência dos sistemas atuais, a adoção e aplicação dos conceitos inseridos no desenvolvimento sustentável, visando o equilíbrio econômico, social e ecológico (CORMIO et al., 2003).

O Brasil possui uma elevada capacidade para geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis, tendo em vista a grande potencialidade e diversidade territorial e climática. A ampla diversidade das matérias-primas e a oportunidade de se explorar o sinergismo entre as diversas fontes colocam-no em uma posição privilegiada para a definição de uma matriz energética predominantemente renovável. (HENRIQUES, 2009)

De acordo com o Banco de Informações de Geração (BIG), da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), em 2016, estavam em operação no país 4.487 empreendimentos

do gênero, totalizando 142.566 MW. Nota-se que as fontes renováveis, através de recurso hídrico, biomassa, eólica e solar, representam 79,7% da capacidade total, o equivalente a 113.617 MW. A geração hidrelétrica possui a maior parcela da oferta por meio das usinas hidrelétricas (UHE), centrais geradoras hidrelétricas (CGH) e pequenas centrais hidrelétricas (PCH), concentrando 64,81% da capacidade geradora, ou 92.392 MW. Por sua vez, as termelétricas (UTE) representaram 27,75%, o equivalente a 39.558 MW, tanto abastecidas por combustíveis fósseis, quanto através da biomassa. Por fim, as centrais geradoras eólicas (EOL), usinas term nucleares (UTN) e usinas fotovoltaicas (UFV) têm capacidades de 8.592 MW (6,03%); 1.990 MW (1,4%); 22 MW (0,02%); respectivamente, conforme ilustra a Figura 2.1. (ANEEL, 2016)

Figura 2.1 – Capacidade instalada de energia elétrica por fonte em 2016

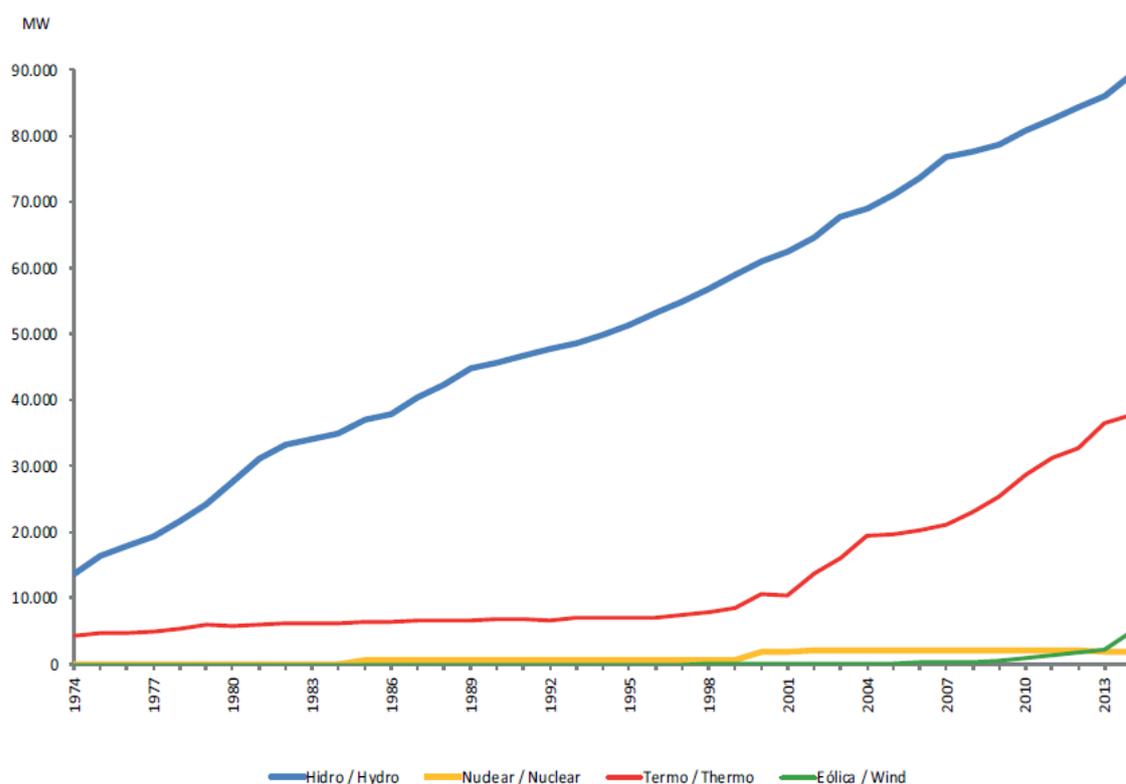


Fonte: BIG (ANEEL, 2016).

Muito embora a participação das hidrelétricas no Brasil tenha total predominância sobre as demais fontes geração de energia, logicamente devido à abundância dos recursos hídricos, das características de relevo espalhadas pelo território nacional, do sistema interligado brasileiro e pela capacidade de acumulação plurianual (características do reservatório), nota-se que é expressivo o crescimento e a participação da geração termoeletrica – incluindo as usinas movidas por combustíveis fósseis, como também as renováveis –, conforme ilustra a Figura 2.2. Nos últimos 17 anos, de 1999 a 2016, de acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN) houve um aumento da capacidade instalada das usinas térmicas indo de aproximadamente 10 GW para 40 GW. É possível constatar ainda que

a sua participação tenha evoluído consideravelmente a partir da crise de abastecimento ocorrida no ano de 2001, uma vez que esse fato resultou na elaboração de um plano emergencial de racionamento de energia elétrica, além do processo de reestruturação e criação de um novo modelo do sistema elétrico brasileiro. Neste modelo, a geração termelétrica passou a ter um papel mais relevante do que anteriormente. (EPE, 2015)

Figura 2.2 – Evolução da capacidade instalada de energia elétrica por fonte entre 1974 e 2014



Fonte: BEN (EPE, 2015).

Dantas (2013) sustenta a hipótese de que nos próximos anos existirá a crescente necessidade de geração complementar ao parque hidrológico, ao longo do período seco do ano, e que indicam que a geração termelétrica por meio da bioeletricidade poderá exercer uma função importante nessa complementação.

Paro (2011) afirma que, independente das diferenças tecnológicas entre as formas de geração, é importante manter a complementação hidrotérmica do sistema elétrico equilibrada, o suficiente para garantir a maior confiabilidade do suprimento de energia elétrica.

Por outro lado, diversas questões como, por exemplo, a distribuição geográfica da produção, a confiabilidade e flexibilidade de operação, a disponibilidade e preços de combustíveis, os prazos de instalação e construção, as condições de financiamento e

licenciamento ambiental, trouxeram à tona inúmeros empecilhos para instalação e grandes centrais de geração. (LORA e HADDAD, 2006)

Diante dos aspectos supracitados, no atual momento verifica-se o aumento da Geração Distribuída (GD) e formas de geração descentralizada em menor escala, associadas aos consumidores, imprimindo a visão de aumento da eficiência de utilização dos recursos energéticos, e a conseqüente minimização dos impactos ambientais do seu processo. Para que haja difusão e apoio torna-se válido salientar os atuais benefícios inerentes às políticas públicas nacionais e internacionais, como o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) e os créditos de carbono; o Programa de Incentivo as Fontes Alternativas de Energia (PROINFA); e, em termos de incentivos regulatórios do sistema elétrico, a Resolução Normativa (REN) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) nº 77/2004, nº 482/2012 e nº 687/2015 (detalhadas na seção 2.1.3.1). (BRIGNOL, 2013)

De acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) é previsto, de 2014 até 2024, uma taxa média de crescimento do consumo anual da rede em 3,9%. Já a expansão da potência instalada prevista até 2024 acrescentará 73,5 GW no Sistema Interligado Nacional (SIN), correspondendo a um acréscimo de 51% na oferta de eletricidade, com maior representatividade e expansão relacionada às fontes renováveis. (EPE, 2015)

2.1.2 Biomassa como alternativa energética

A biomassa é considerada uma das principais fontes de geração energética sustentável e GD nos próximos anos, contribuindo tanto para a redução de dependência dos combustíveis fósseis e emissão de gases do efeito estufa, quanto para a diversificação da matriz energética. (DUARTE, 2009; ANEEL, 2008)

Do ponto de vista energético, a ANEEL define a biomassa como um recurso renovável constituído, principalmente, das substâncias de origem orgânica que possam ser transformadas em energia mecânica, térmica ou elétrica; essa matéria contém a energia química acumulada através da transformação energética da radiação solar e pode ser diretamente liberada por meio da combustão, ou ser convertida em produtos energéticos de natureza distinta por meio de diferentes processos, tais como carvão vegetal, etanol, gases combustíveis e de síntese, óleos vegetais combustíveis e outros. De acordo com sua origem, as fontes de transformação energética podem ser classificadas como: florestais, resíduos agrícolas, dejetos animais e matéria orgânica, contidos nos rejeitos industriais e urbanos. Os

derivados obtidos são denominados biocombustíveis, cujo valor energético depende diretamente do tipo de matéria-prima. (EPE, 2015; ANEEL, 2008)

A participação da biomassa na matriz energética nacional representa aproximadamente 8,8%, o equivalente a 13.352 MW de potência instalada em 2015. Ademais, sua parcela representa 33,7% da capacidade de geração térmica do país, dispondo de 523 usinas, conforme apresentado na Tabela 2.1. Além disso, é possível constatar, através da Figura 2.3 que os biocombustíveis de maior representatividade provêm de origem agrícola, sendo que 411 usinas representam uma capacidade de geração de 10.711 MW – o equivalente a 80,3% da geração da biomassa. (ANEEL, 2016)

Tabela 2.1– Capacidade instalada de energia elétrica de acordo com o biocombustível

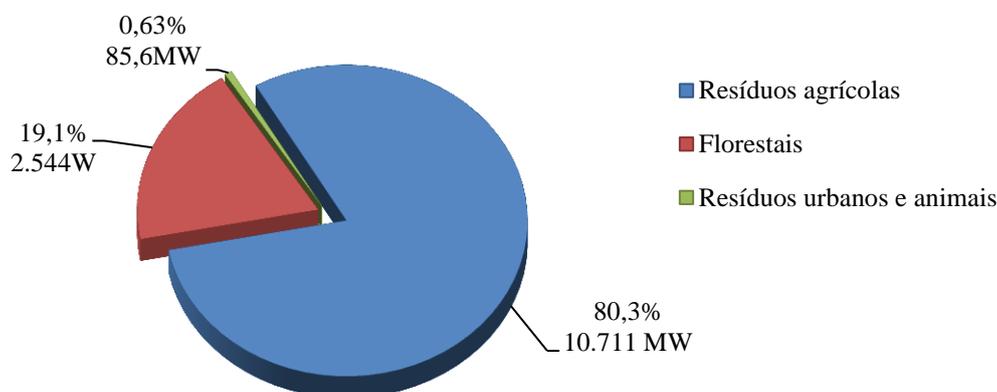
Origem	Biocombustível	Nº de usinas	Capacidade total
Resíduos agrícolas	Bagaço da cana-de-açúcar	394	10.594,4 MW
	Casca de arroz	12	45,33 MW
	Capim de elefante	3	65,7 MW
	Biogás	2	1,72 MW
	Óleo vegetal	2	4,35 MW
Florestais	Licor negro	17	1.978,1 MW
	Resíduos florestais	51	389,52 MW
	Gás de alto forno	10	114,26 MW
	Carvão vegetal	7	51,39 MW
	Lenha	1	11,5 MW
Resíduos sólidos urbanos	Biogás	14	83,69 MW
Resíduos animais	Biogás	10	1,92 MW
	Total	523	13.352 MW

Fonte: BIG (ANEEL, 2016).

Atualmente, as duas fontes bioenergéticas mais empregadas para geração de energia elétrica são o bagaço da cana de açúcar (advindo do processo de produção do açúcar e álcool) e o licor negro (provindo do processo de fabricação de papel e celulose). Ao total, as 394 usinas sucroalcooleiras representam 79% da capacidade instalada de biomassa, correspondendo a 10,59 GW; por sua vez, 17 plantas de papel e celulose proporcionam uma capacidade instalada de 1,97 GW e representam, aproximadamente, 15% da potência instalada de biomassa. É válido ainda destacar a participação dos seguintes biocombustíveis, malgrado em menor escala de utilização: resíduos de animais e sólidos urbanos, por meio da

produção de biogás; resíduos florestais, lenha e carvão vegetal; óleos vegetais; capim de elefante e casca de arroz, sendo esse último o foco da presente dissertação.

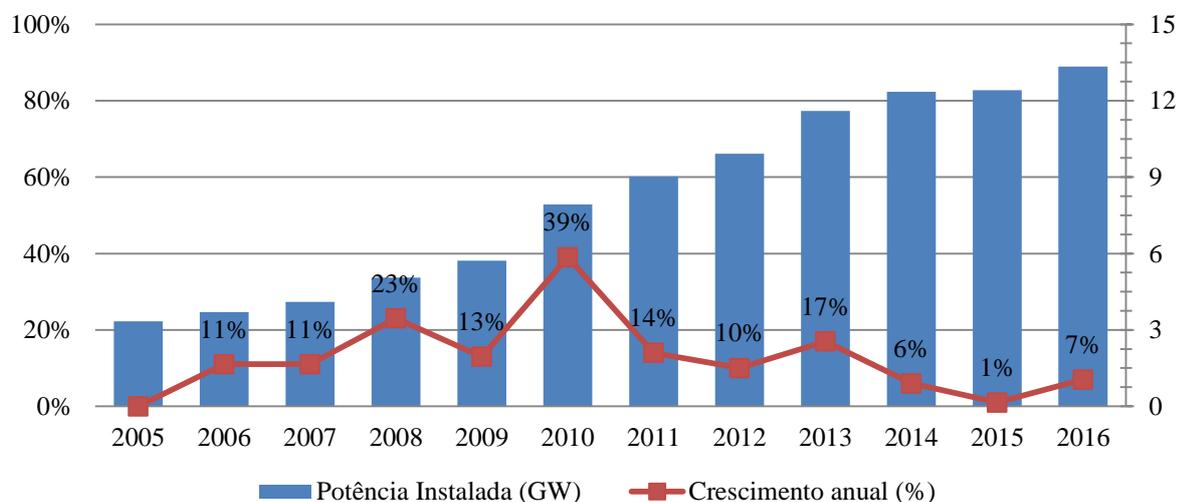
Figura 2.3 – Capacidade instalada de energia elétrica de acordo com a origem da biomassa



Fonte: BIG (ANEEL, 2016).

No Brasil, nos últimos 11 anos é possível constatar um aumento da capacidade instalada de geração de potência através da biomassa próxima a 400%, partindo do patamar de 3,33 GW em 2005, chegando aos atuais 13,34 GW em 2016, conforme ilustra a Figura 2.4. Segundo Barin (2012), um dos motivos que levam a sua expansão se deve efetivamente às principais características dos empreendimentos correlacionados a GD da biomassa: pequeno porte em potência instalada, que favorecem sua instalação nas proximidades nos centros de consumo e suprimento.

Figura 2.4 – Crescimento da capacidade instalada de energia elétrica proveniente da biomassa



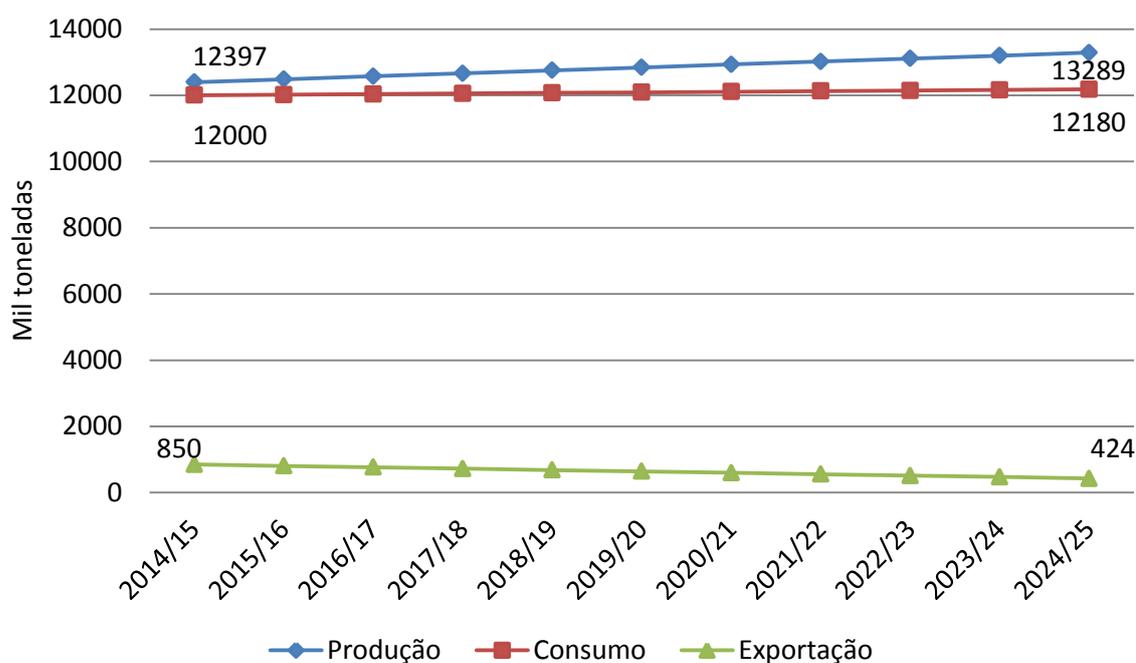
Fonte: BEN (EPE, 2015).

Finalmente, o PDE 2024 prevê um crescimento de potência de 6,81 GW até 2024, a partir de geração de energia através da biomassa, o que corresponde a uma expansão em mais de 50% da potência instalada atual. Este fato demonstra de uma maneira geral, a potencialidade dos biocombustíveis e a sua importância para complementariedade de geração de energia a nível nacional. (EPE, 2015)

2.1.2.1 Disposição e potencial da casca de arroz

O arroz é o segundo cereal mais produzido no mundo (superado apenas pelo trigo), sendo consumido por 2/3 da população mundial. O Brasil é o nono maior produtor de arroz do mundo, e o maior fora da Ásia, tendo colhido na safra 2014-2015 cerca de 12,4 milhões de toneladas e. Ainda mais, projeta-se para 2024-2025 uma produção nacional de 13,3 milhões de toneladas do produto, o que representa um crescimento próximo a 7,2% frente ao período atual, de acordo com a Figura 2.5. O Rio Grande do Sul destaca-se como maior estado produtor de arroz do Brasil, sendo responsável por 68,1% da produção nacional, além de ser o estado com maior parque agroindustrial para o processamento deste produto. (CONAB, 2016; MAPA, 2015; FAO, 2014)

Figura 2.5 – Projeção de produção, consumo e importação de arroz até 2025



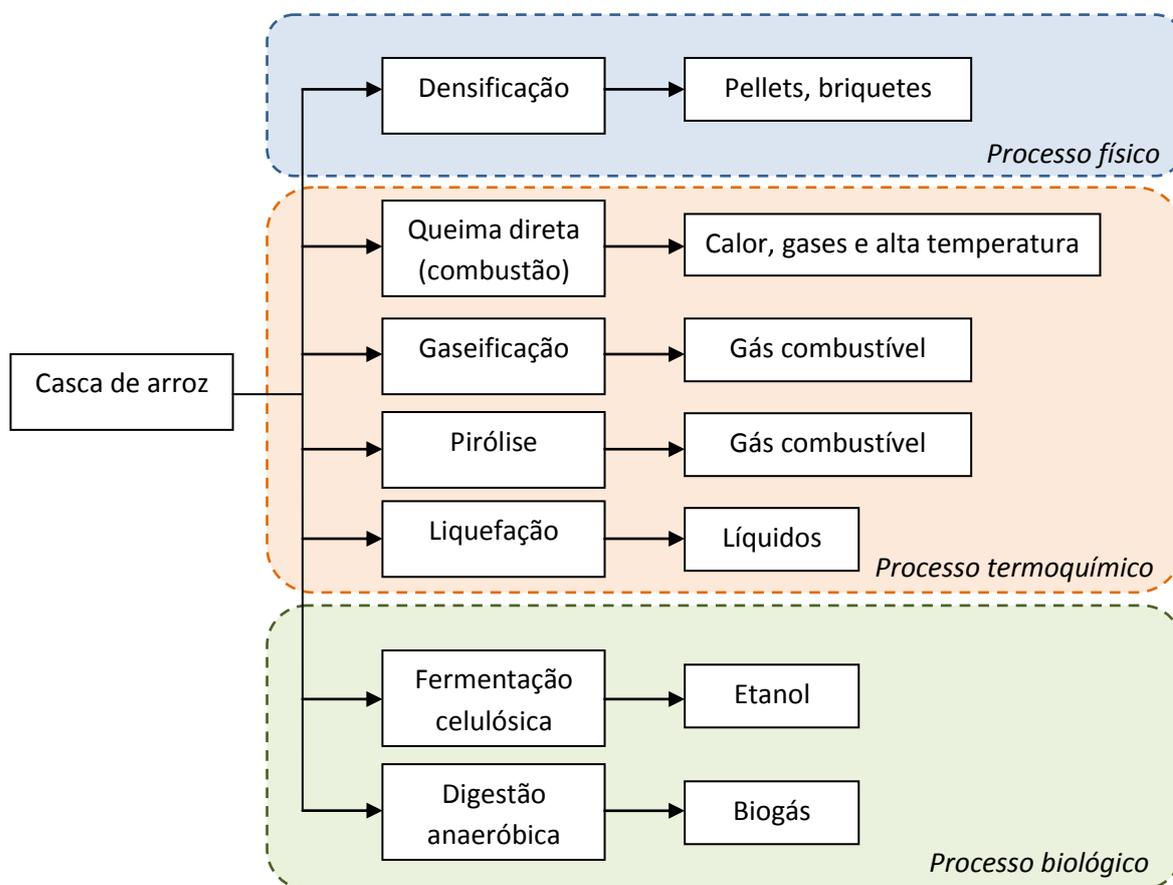
Fonte: (MAPA, 2015).

O processo de beneficiamento de arroz, conforme descreve Ludiwic (2004), consiste genericamente nas seguintes etapas: recebimento da matéria-prima na unidade de industrialização (após colheita); pré-limpeza, secagem, armazenagem, limpeza, descascamento, polimento, separação e classificação dos grãos; embalagem e armazenagem para posterior distribuição e comercialização. O subproduto de maior expressividade gerado pelo processo de beneficiamento e, conseqüentemente, resíduo agrícola industrial, é a casca de arroz. (BHAT et al., 2001 apud HENRIQUES, 2009).

Diferentes pesquisas relatam que a casca de arroz representa, em média, 20% do seu peso (FOLETTTO et al., 2005) e que, portanto, remete a uma produção nacional de 2,23 milhões de toneladas de casca anualmente. É importante destacar ainda que o poder calorífico da casca de arroz é superior ao poder calorífico do bagaço da cana-de-açúcar, atualmente o principal biocombustível para geração de eletricidade no Brasil. Sem valor comercial devido à dureza, fibrosidade e abrasividade, além de possuir baixa propriedade nutritiva e elevado teor de sílica, torna a sua compostagem um dos destinos mais usuais para casca de arroz, com a finalidade de redução da matéria orgânica, senão do aproveitamento energético. Entretanto, nesse processo são constatados problemas ambientais em função do alto tempo de biodegradação, da quantidade de metano emitido à atmosfera e da baixa massa específica. Logo, o aproveitamento energético desse biocombustível pode contribuir tanto para amenizar os impactos ambientais, quanto para geração de energia, abastecendo as agroindústrias que fazem o beneficiamento do grão (ALMEIDA, 2010; DINIZ, 2009).

Para Hoffmann (1999), a baixa densidade energética da casca de arroz indica a necessidade de transformação em um vetor energético de maior densidade (eletricidade, combustível líquido ou gasoso, sólidos processados e outros). Os tipos de transformação e conversão energética dessa biomassa por meio de processos primários podem ser divididos em três grupos: processos físicos, termoquímicos e biológicos, conforme ilustra a Figura 2.6.

Figura 2.6 – Processos para transformação energética da casca de arroz



Fonte: próprio autor com base em MAYER (2009).

A densificação é processo físico usualmente utilizado para aproveitamento energético da casca de arroz (HOFFMANN, 2006), consistindo na compactação e transformação numa massa sólida atrelada ao aumento da massa específica e poder calorífico. (VIEIRA, 2012)

Os processos termoquímicos, caracterizados pela alta temperatura associada na conversão energética, subdividem-se em: combustão – transformação de energia química em calorífica (BRIDGWATER, 2003); gaseificação – transformação total ou parcial da matéria orgânica em gases (ANGULO, 2002); pirólise – decomposição química de biomassa e produção de vapores condensáveis, não condensáveis e resíduos sólidos (BRIDGWATER & PEACOCKE, 2000); e liquefação – conversão da biomassa em combustíveis líquidos (DEMIRBAS, 2000).

Por fim, podem ser utilizados ainda os processos biológicos referentes à: fermentação celulósica – conversão bioquímica da biomassa em etanol; e digestão anaeróbica – conversão bioquímica da matéria orgânica em biogás. (DINIZ, 2009)

Atualmente no Brasil há 12 usinas em operação para geração de potência elétrica por meio da casca de arroz, de acordo com a Tabela 2.2, totalizando uma capacidade instalada de 45,333 MW, sendo que o RS possui 9 destas usinas, inclusive a maior em atividade no país, com potência de 12,5 MW. Todas as usinas fazem uso do processo termoquímico através da combustão para transformação da biomassa residual.

Tabela 2.2 – Capacidade de geração das usinas que utilizam casca de arroz

Usina	Município – Estado	Capacidade
UTE Iguazu Borja Energética Ltda	São Borja – RS	12,5 MW
SLC Alimentos Ltda	Capão do Leão – SC	5,8 MW
Sílica Verde do Arroz Ltda	Alegrete – RS	4,9 MW
Camil Alimentos SA	Itaqui – RS	4,2 MW
Camil Alimentos SA	Itaqui – RS	4 MW
Cooperativa Agroindustrial Alegrete Ltda	Alegrete – RS	3,825 MW
Rical	Vilhena – RO	2,288 MW
Urbano Agroindustrial Ltda	São Gabriel – RS	2,22 MW
Arevale Ltda	Roseira – SP	2 MW
Urbano Agroindustrial Ltda	Sinop – MT	1,2 MW
Indústria e Comércio de Arroz Fumacense Ltda	Capão do Leão – SC	1,2 MW
Engenho Coradini Ltda	Dom Pedrito – RS	1,2 MW
Total		45,333 MW

Fonte: BIG (ANEEL, 2016).

Tendo em vista o montante anual gerado de casca de arroz na cultura orizícola é possível constatar um potencial de geração reprimido do biocombustível, uma vez que sua representação é de apenas 3,2% na capacidade instalada referente à biomassa. Ainda assim, é possível prever uma maior participação dessa fonte geradora, principalmente ligada à expansão da geração distribuída nas próprias indústrias de beneficiamento, tendo em vista que uma das maiores dificuldades dos empreendimentos de geração, segundo Mayer (2009), é o transporte da casca em função de sua baixa densidade. Uma das características diferenciais das indústrias de beneficiamento de arroz é a geração contínua de resíduos (os grãos com casca, oriundos da colheita, são conservados em silos e armazéns, de forma a atender uma produção contínua ao longo do ano), diferentemente de outras fontes bioenergéticas que são sazonais (como a cana-de-açúcar), contribuindo para aumentar o Fator de Utilização (FU) da usina. Além da disposição e capacidade de transformação energética e da melhoria dos fatores ambientais já mensurados, o potencial atrelado a essa forma de geração também deve estar

vinculado à evolução constante dos arranjos tecnológicos e das políticas nacionais e internacionais de incentivo a GD.

Hoffmann e Mayer (2014) afirmam que apenas no estado do RS há um potencial de geração de energia elétrica de 79,5 MW por meio do aproveitamento da casca de arroz, o que representaria uma expansão superior a 75% da potência atualmente instalada no país.

2.1.3 Geração distribuída

Existem muitas definições para Geração Distribuída (GD), logo, o seu entendimento é dirigido segundo a visão das entidades ou estudos que a definem. Não obstante, pode ser estabelecido, de uma maneira geral, que a expressão GD difere do sistema tradicional de geração centralizada, em função de uma ou mais características, como, por exemplo: a proximidade com centros consumidores, o nível de tensão da rede a ser conectada, a tecnologia utilizada, a potência de geração, ou, até mesmo, o grau de dispersão das unidades de geração em uma instalação geradora. (MACIEL, 2012)

Ackermann (2001) estabelece a GD como uma fonte de geração conectada diretamente na rede de distribuição ou ao consumidor. Nesta definição, a potência instalada não é considerada relevante para sua caracterização. No entanto, o autor estabelece uma divisão em categorias em função da potência: micro (até 5 kW), pequena (de 5 kW a 5 MW), média (de 5 MW a 50 MW) e grande (de 50 MW a 300 MW).

Em nível internacional, a *Council on Large Electric Systems* (CIGRE) define GD como a geração que não é planejada de modo centralizado, nem despachada de forma centralizada, não havendo, portanto, um órgão que comande as ações das unidades de geração descentralizada. De acordo com o *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), GD é uma central de geração pequena o suficiente para estar conectada a rede de distribuição e próxima do consumidor. (MALFA, 2002)

No contexto nacional, a GD foi definida de forma oficial, através Decreto nº 5.163/2004, como sendo a produção de energia elétrica proveniente de empreendimentos de agentes concessionários, permissionários, ou autorizados, conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador, exceto empreendimentos advindos de usinas hidrelétricas com capacidade instalada acima de 30 MW e termelétricos ou sistemas de cogeração com eficiência energética inferior a 75% (com exceção da biomassa).

A ANEEL (2016), de forma semelhante à Ackermann (2001), define GD como centrais geradoras de energia elétrica, de qualquer potência com instalações conectadas

diretamente no sistema elétrico de distribuição ou através de instalações de consumidores, podendo operar em paralelo ou de forma isolada, e despachadas – ou não – pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

Independente da conceituação acerca da GD é válido destacar a importância que a mesma deverá desempenhar nos próximos anos. Sua contribuição, segundo Haddad et al. (2010), está vinculada a: diversificação da matriz energética, baixo impacto ambiental e menor tempo de implantação, postergação de investimento de expansão nos sistemas de transmissão, subtransmissão e distribuição, redução do carregamento dos condutores e consequente redução de perdas na rede elétrica, aumento da confiabilidade do sistema, possibilidade de operar de forma ilhada, melhorar os níveis de tensão em períodos de carga pesada.

No Brasil, no contexto de GD, foram definidas as figuras do Autoprodutor de Energia (APE) e do Produtor Independente de Energia (PIE). A primeira é definida como a pessoa física ou jurídica ou empresas reunidas em consórcio que recebam concessão ou autorização para produzir energia elétrica destinada ao seu uso exclusivo; já o PIE, é a pessoa jurídica ou empresas reunidas em consórcio que recebam concessão ou autorização para produzir energia elétrica destinada ao comércio de toda ou parte da energia produzida.

2.1.3.1 Políticas e programas de desenvolvimento da geração distribuída

A disseminação do desenvolvimento sustentável, definido como uma forma de desenvolvimento ou progresso que satisfaça as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das futuras gerações (SCMIDHEINY, 1992), trouxe a criação de políticas e incentivos tanto a nível internacional, quanto a nacional. Uma das medidas internacionais foi o Protocolo de Kyoto (PELEGRINI, 2009), adotado em 1997, que estipulou um limite de emissão de GEE por meio de reduções compulsórias nas emissões de países desenvolvidos. Uma das medidas apresentadas, visando à integração de outros países não incluídos no Protocolo e auxílio para o atingimento das metas estabelecidas, foi através a criação do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). Assim sendo, a quantidade relativa à diminuição de emissão de GEE ou sequestro de CO₂ pode resultar em créditos e estes serem negociados comercialmente entre os países não participantes e participantes do Protocolo, através de Certificados de Emissão Reduzidas (CER). No Brasil, até o ano de 2009, estavam registrados 3 projetos relacionados a casca de arroz, que fizeram o uso do MDL, representando uma redução de emissão anual equivalente a 92 toneladas de CO₂.

O grande marco regulatório a nível nacional de incentivo aos sistemas de geração de energia baseados em fontes primárias renováveis, incluindo a biomassa da casca de arroz, ocorreu por meio do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), em 2002. Este programa tem o objetivo de aumentar a participação de energia elétrica produzida por empreendimentos voltados à biomassa (exclusivamente para o aproveitamento de casca de arroz, cana-de-açúcar e madeira), eólica e PCH. Para isto, ele foi dividido em duas etapas, sendo que a primeira visava à contratação de 3300 MW divididos igualmente entre as fontes; e a segunda fase, o estipulou regras para que a participação destas fontes renováveis de energia fornecesse até 10% de toda a demanda de energia elétrica no Brasil num horizonte de vinte anos. Ademais, a regulamentação do PROINFA incorporou mecanismos para o uso de equipamentos nacionalizados (VELÁZQUEZ, 2006).

Já a ANEEL, por meio de incentivos regulatórios do setor elétrico à GD e às fontes renováveis de energia, estabeleceu as REN n° 77/2000, n°482/2012 e n° 687/2015. A primeira desenvolve mecanismos para atribuir descontos na Tarifa do Uso do Sistema de Transmissão (TUST) e na Tarifa do Uso do Sistema de Transmissão (TUSD), cuja potência injetada seja menor do que 30 MW. Já a segunda e terceira resoluções criaram medidas para reduzir as barreiras para a penetração da geração distribuída de pequeno porte, estabelecendo regras que incluem a microgeração com potência instalada menor ou igual a 75 kW, e a minigeração, com potência instalada superior a 75 kW e menor igual a 3 MW, para a fonte hídrica, ou 5MW para as demais fontes. Cria também o sistema de compensação de energia, que permite ao consumidor instalar pequenos geradores em sua unidade consumidora e trocar energia com a distribuidora local. Ambas as condições dos regulamentos são válidas para geradores que utilizem fontes incentivadas de energia: biomassa, hídrica, solar, eólica e cogeração qualificada (ver seção 2.1.5). (ANEEL, 2015; 2012; 2004)

Ainda, o Decreto n° 5.163/2004 instituiu que a compra de energia elétrica pelas concessionárias de distribuição pudesse ser proveniente de empreendimentos de GD desde que o montante de compra de energia não exceda de 10% do seu mercado consumidor anual. (ANEEL, 2005)

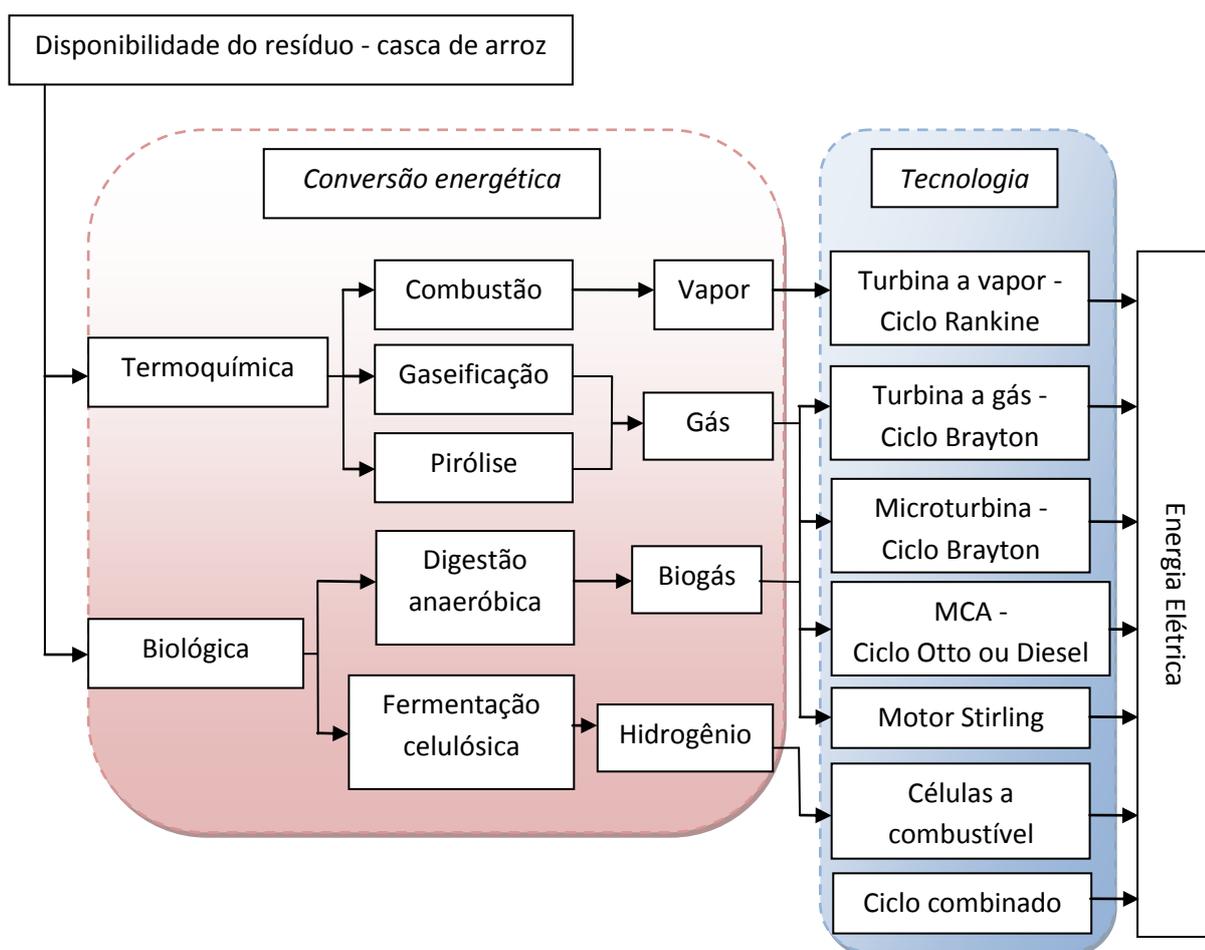
2.1.4 Tecnologias para geração distribuída

Nesta seção são apresentadas as principais tecnologias para GD através da biomassa proveniente da casca de arroz. Com relação aos sistemas de GD exclusivamente para geração de energia elétrica, são apresentadas as tecnologias convencionais: turbina a vapor, turbina a

gás, microturbina, Motor de Combustão Alternativo (MCA), motor Stirling, células a combustível e ciclo combinado – este último resulta da associação duas tecnologias.

A Figura 2.7 ilustra as rotas tecnológicas a serem empregadas para geração de eletricidade, coligando com os respectivos processos de transformação energética da biomassa.

Figura 2.7 – Rotas tecnológicas para geração de energia elétrica por meio da casca de arroz



Fonte: próprio autor.

2.1.4.1 Turbina a Vapor

Em se tratando da biomassa, o sistema de geração de energia elétrica por meio de turbinas a vapor constitui-se na opção tecnológica mais difundida atualmente (SALES, 2008). Trata-se de uma máquina motriz que transforma o vapor expandido sob variadas pressões e temperaturas, em energia cinética e mecânica, para posterior geração de eletricidade. Nesse ciclo termodinâmico, denominado Rankine, o fluido de trabalho – normalmente a água – é

sucessivamente vaporizado (por meio da caldeira – equipamento que transforma a energia da biomassa em energia cinética do fluido, através da combustão) e condensado (por meio de condensadores), constituindo-se, portanto, em um circuito fechado. A característica diferencial do ciclo de Rankine se deve à combustão externa, isto é, os gases da combustão não entram em contato direto com o fluido de trabalho. Dentre as principais vantagens de utilização do ciclo de Rankine frente aos demais estão: maior vida útil, menor gasto com manutenção, e maior confiabilidade.

Há ainda uma subdivisão quanto à classificação da turbina: (SALES, 2008)

– Condensação: o vapor na saída da turbina encontra-se a uma pressão menor do que a atmosférica, sendo empregadas em centrais termelétricas onde se busca maximizar produção dessa forma de energia em detrimento da forma térmica.

– Contrapressão: o vapor na saída da turbina encontra-se a uma pressão maior ou igual à atmosférica, e a energia térmica residual normalmente é utilizada em processos industriais (nessas aplicações, a demanda térmica é prioritária sobre a geração elétrica).

– Extração: muitas vezes as turbinas de condensação e contrapressão possuem tomadas de vapor intermediário para abastecimento de processos industriais, que passam a ser realizadas por meio das turbinas de extração.

A eficiência global de um processo, comumente chamada de Fator de Utilização de Energia (FUE), considerando apenas a conversão da energia da biomassa para geração de eletricidade, possui índices com certa variância em algumas bibliografias. Segundo Wu e Wang (2006) esse índice situa-se na faixa entre 30 a 40%; Barja (2006) considera 35%; para Henriques (2009) essa eficiência pode chegar aos patamares de 38 a 40%; Paro (2011) considera 40%. Muito embora haja uma limitação na conversão energética associada à eficiência térmica do ciclo, de acordo com as leis da termodinâmica (HORLOCK, 1997), alguns fatores influenciam efetivamente na conversão energética final. Estes fatores ora contribuem para aumentar, ora para diminuir o índice, como, por exemplo, a eficiência da caldeira e do condensador (sendo que o respectivo custo está intimamente ligado à eficiência do equipamento), a escala de geração, a existência ou não de cogeração, o tipo de turbina e modelo empregado, a qualidade da biomassa da casca de arroz, dentro outros fatores.

Atualmente todas as usinas que utilizam casca de arroz para geração de energia elétrica fazem uso de tecnologia associada às turbinas hidráulicas ao ciclo Rankine.

Segundo Barja (2006), a potência destes ciclos geralmente é da ordem de 0,5 a 100 MW, podendo chegar a 1,35 GW, como no caso de Angra II.

2.1.4.2 Turbina a gás

A turbina a gás é uma máquina de combustão interna de construção compacta, que opera no ciclo termodinâmico de Brayton (BARJA, 2006). Apesar do nome, esse tipo de turbina pode utilizar uma diversidade de combustíveis líquidos e também gasosos – como é o caso do gás ou biogás gerado pela biomassa. O processo da máquina é dado, inicialmente, pela admissão e compressão do fluido de trabalho, o ar atmosférico, que adentra na câmara de combustão, local onde também é injetado o combustível, o gás ou líquido, para então formar uma chama contínua, elevando a temperatura e a pressão da mistura entre os agentes. Os gases resultantes da combustão expandem-se na turbina, convertendo a energia cinética do escoamento em trabalho mecânico para posterior geração de eletricidade. O FUE da turbina a gás, através do ciclo Brayton convencional, considerando apenas geração de eletricidade, situa-se na faixa de 34% (HENRIQUES, 2009) e 35% (PRIETO, 2003).

As turbinas a gás podem ser classificadas em duas classes: *heavy duty* e aeroderivadas. O primeiro tipo de turbina possui rendimento inferior, sendo utilizada propositalmente para aproveitamento dos gases e para cogeração, tendo maior vida útil, robustez, flexibilidade quanto aos tipos de combustíveis, como também maior peso e volume; já o segundo tipo de turbina, a aeroderivada, é oriundo da adaptação de turbinas aeronáuticas para uso industrial e têm aplicação na geração de energia elétrica, e por isso seu nível de eficiência energética é superior, além de apresentar maior relação de potência/peso. (NETO, 2001)

A casca de arroz pode ser transformada em gás por meio do processo de gaseificação ou pirólise, conforme visto na seção 2.1.2.1, para posterior utilização das turbinas a gás. No entanto, até o momento, não há nenhuma usina de casca de arroz em operação que faça utilização dessa tecnologia a nível nacional. Ainda assim, é possível encontrar usinas com outros tipos de combustíveis em operação, com capacidades que variam de 1 MW até superiores a 250 MW (BARJA, 2006).

2.1.4.3 Microturbinas

As microturbinas constituem-se em turbinas a gás de pequeno porte, caracterizadas pelo ciclo aberto e termodinâmico de Brayton, e pela possibilidade de geração de energia em pequena escala. A capacidade das microturbinas varia entre 30 kW e 500 kW, e o FUE, considerando apenas a conversão em eletricidade, varia em torno de 18% (sistemas sem

recuperação de calor) a 30% (sistemas com recuperação de calor), dependendo da tecnologia associada. (BRIGNOL, 2013)

O princípio de funcionamento das microturbinas é dado pela compressão do ar atmosférico, que é direcionado à câmara de combustão, local onde o gás ou biogás é injetado e se mistura com o ar, formando então uma mistura inflamável. Os gases aquecidos e sob alta pressão são expandidos por meio das pás da turbina, transformando energia térmica em energia mecânica. A energia gerada pela turbina tanto aciona um gerador elétrico, produzindo eletricidade, como também move o compressor, tornando um processo de combustão contínua. (LORA E HADDAD, 2006)

Dentre as vantagens de utilização desse sistema estão: alta confiabilidade, simplicidade e projetos compactos, com baixo custo, além de fácil instalação e manuseio. Ainda, se comparada aos MCA, as microturbinas possuem maior ganho ambiental por emitirem menos gases poluentes, como também podem ser utilizadas configurações para cogeração de energia para maximizar o FUE; por outro lado, os equipamentos usados com ela exigem maior tratamento e controle das propriedades do combustível, acarretando no uso de sistemas de purificação do gás, além de possuir maior custo financeiro agregado do projeto. (MARTINS, 2012)

A maior usina em operação com essa tecnologia se localiza nos Estados Unidos, com aproveitamento do biogás decomposto a partir de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), dispõe de 50 unidades de microturbinas com potência de 30 kW cada, totalizando 1,5 MW de potência instalada.

2.1.4.4 *Motor de combustão alternativo*

Os Motores de Combustão Alternativos (MCA) são amplamente utilizados e constituem a mais desenvolvida de todas as tecnologias de GD, apresentando um FUE que varia de 25% a 45% (LORA E HADDAD, 2006), considerando apenas a conversão do combustível em eletricidade. Tanto as turbinas a gás quanto os MCA são equipamentos de combustão interna, sendo ainda que os MCA são subdivididos em dois grupos: os de ignição por centelha (denominados de motores de ciclo Otto) e os de ignição por compressão (denominados de motores de ciclo Diesel).

Nos motores de ciclo Otto, dentre os diversos tipos de combustíveis utilizados, está o biogás – gerado pela digestão anaeróbica através da conversão biológica. Nesse ciclo, o motor aspira uma pré-mistura de ar e combustível, na câmara de combustão, local onde ocorre a

combustão, iniciada pela vela de ignição. A força expansiva dos gases de combustão provoca o movimento cíclico de um pistão num cilindro, produzindo energia mecânica e posteriormente geração de energia elétrica. Já nos motores Diesel – que utilizam diferentes combustíveis líquidos, como óleos combustíveis e misturas de combustíveis gasosos com líquidos – a combustão ocorre por meio de difusão, iniciada por autoignição, de modo que a aspiração de ar não tenha restrição e a quantidade de combustível é ajustada conforme o requerimento de potência. (SALES, 2008)

Dentre as diferenças do ciclo Diesel para o Otto está a alta taxa de compressão empregada no primeiro, fazendo com que o seu FUE, considerando o ciclo aberto, supere valores de 45%, podendo chegar a 50%. Diferentemente dos motores Otto, que apresentam taxas de compressão inferiores, e os rendimentos alcançam valores em torno de 35% (BARJA, 2006).

A escolha da tecnologia aplicada aos MCI, adaptados a biogás, compete diretamente com sistemas que utilizam turbinas a gás. As faixas de capacidade de geração partem de uma pequena potência (5 kW) até índices superiores a 30 MW, e apresentam desvantagens ambientais no que se refere à emissão de poluentes à atmosfera. Porém, há a possibilidade de adaptação dos sistemas de cogeração de energia, o que maximiza o aproveitamento energético do combustível, como também mitiga os impactos ambientais. (LORA E HADDAD, 2006)

2.1.4.5 *Motor Stirling*

O Motor Stirling é classificado como uma máquina de combustão externa, e pode ser utilizado em projetos de microgeração de energia usando o gás ou biogás. O equipamento é um motor térmico que trabalha a partir da energia proveniente da expansão e contração de um gás ou fluido de trabalho. Possui, basicamente, dois lados: o lado quente – que utiliza energia térmica, proveniente de outra fonte energética, para geração de trabalho mecânico; e o lado frio – denominado congelador. O FUE, considerando apenas a eficiência elétrica do ciclo Stirling encontra-se na faixa de 12 a 20%, podendo chegar até a 30% (HOFFMANN, 2015; LORA E HADDAD, 2006;)

As principais desvantagens estão associadas ao custo do equipamento, considerado superior aos MCA, e a pequena faixa de disponibilidade de potência para geração – de 1 kW até 25 kW. (LORA E HADDAD, 2006)

2.1.4.6 Célula a combustível

A célula a combustível consiste em um dispositivo eletroquímico capaz de converter a energia disponível no combustível em eletricidade, sem estágios intermediários de combustão ou trabalho mecânico. Os reagentes utilizados nas células a combustível não portáteis, usualmente o hidrogênio e o oxigênio, não necessitam ser recarregados, tendo em vista que os mesmos são fornecidos de maneira contínua. (BARIN, 2012)

O principal combustível utilizado é o hidrogênio, sendo que uma das maneiras de obtê-lo é por meio do biogás, gerado pela digestão anaeróbica através da conversão biológica. Atualmente existem diversos modelos de células a combustível para geração de eletricidade, porém há especialmente alguns que fazem o uso do biogás: PAFC (*Phosphoric Acid Fuel Cells*), MCFC (*Molten Carbonate Fuel Cells*) e SOFC (*Solid Oxide Fuel Cells*).

O principal empecilho da tecnologia a células a combustível está relacionado diretamente ao custo, que atualmente ainda é elevado, se comparado a outras formas de geração. A potência de geração através do biogás depende do modelo de célula utilizado, sendo que a escala varia de 1 kW até 1 MW (FARRET e SIMÕES, 2006). O FUE especificamente para geração de eletricidade situa-se na faixa de 30% a 60%, dependendo do modelo, podendo ainda ser melhorado, em caso de utilização de cogeração de energia (LORA E HADDAD, 2006).

2.1.5 Tecnologias para cogeração de energia

A GD pode, vantajosamente, empregar os sistemas de cogeração para geração conjunta de energia elétrica e térmica, devido a proximidade do gerador com a carga. Existem muitas definições para cogeração, no entanto, de uma maneira geral, é definida como a produção simultânea em processo sequencial de duas ou mais formas de energia a partir de um único combustível. Normalmente, o processo mais comum é a produção de eletricidade e energia térmica (calor ou frio) a partir do uso de combustíveis fósseis ou renováveis, como a biomassa. Horlock (1997) emprega a expressão “produção combinada de calor e potência” para definição desse conceito. Através da aplicação da cogeração é possível alcançar o FUE dos sistemas convencionais de geração em até 85% (BALESTIERI, 2002; HORLOCK, 1997), além de maximizar a utilização e aproveitamento do combustível, aumentando consideravelmente a eficiência global do processo.

O conceito que envolve a cogeração de energia existe há muitos séculos, muito embora os sistemas mais próximos aos que existem hoje passaram a ser desenvolvidos a partir do século XX. Naquele tempo algumas cidades europeias utilizavam o calor oriundo do processo termodinâmico de geração de eletricidade para aquecimento residencial. A partir da década de 40, a geração de energia elétrica começou a se expandir, conseguindo fornecer energia em abundância e a baixo custo. Desta forma, os sistemas de cogeração ficaram limitados a algumas aplicações industriais ou em pequenas regiões. Somente a partir das décadas de 70 e 80, com a maior preocupação referente à energia e ao meio ambiente, os sistemas de cogeração ganharam novo impulso, motivados pelo maior rendimento global, bem como pelo maior aproveitamento do combustível e a minimização dos impactos ambientais associados ao processo de conversão de energia (PARO, 2011; LORA E HADDAD, 2006)

Com relação à funcionalidade da tecnologia, o projeto e aplicação da cogeração se limitam aos casos onde se necessite, indubitavelmente, o atendimento da demanda térmica de um processo industrial. Ainda assim, a potência elétrica gerada atende parcial ou totalmente a planta, existindo também a possibilidade de produção de excedentes de energia elétrica para a venda.

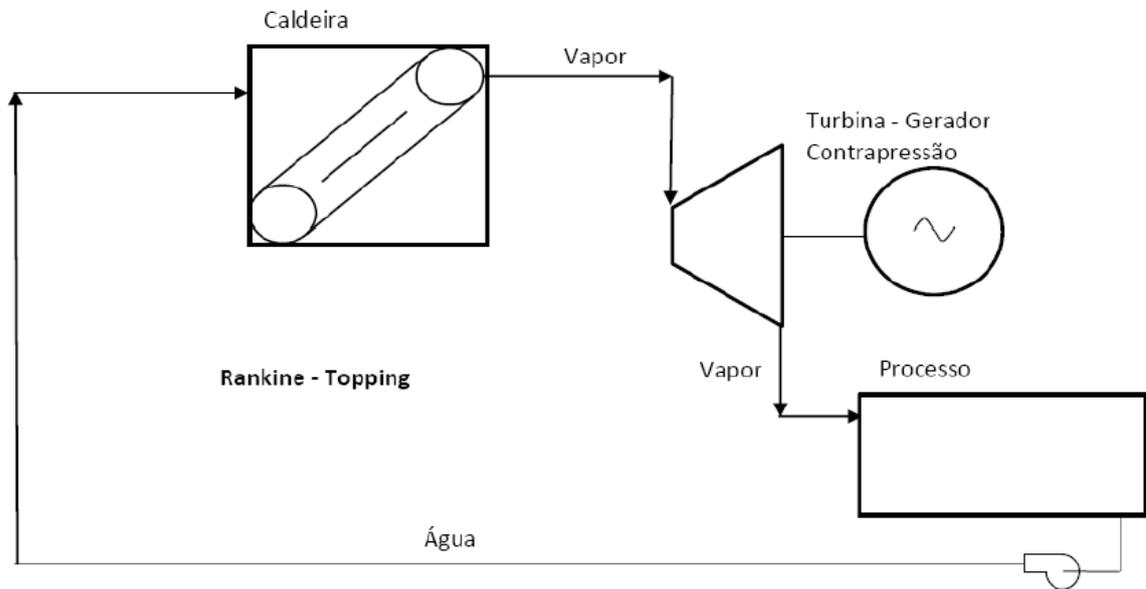
A cogeração de energia pode ser aplicada em dois tipos de configurações possíveis (BALESTIERI, 2002):

- Ciclo montante (topping cycle): o aproveitamento da energia disponibilizada pelo combustível se dá para a geração de energia eletromecânica, e em seguida para o aproveitamento de calor útil.
- Ciclo jusante (bottoming cycle): o aproveitamento da energia disponibilizada pelo combustível é dado primeiramente para fornecimento de calor útil para posterior geração eletromecânica.

O ciclo montante é a configuração mais difundida e aplicada, sendo empregada principalmente em processos que requerem temperaturas moderadas ou baixas, permitindo uma maior versatilidade no momento de escolher o equipamento a utilizar. Do ponto de vista tecnológico, é possível dispor de sistemas de cogeração baseados em turbina a vapor (ciclo Rankine, conforme ilustra a Figura 2.8), turbina a gás (ciclo Brayton, conforme ilustra a Figura 2.9), MCA ou Stirling (ciclo Otto, Diesel, Stirling, conforme ilustra a Figura 2.10), ou, até mesmo, ciclo combinado (integrando o ciclo Brayton com o ciclo Rankine, por exemplo, conforme ilustra a Figura 2.11). Por sua vez, o ciclo jusante é aplicado em processos que

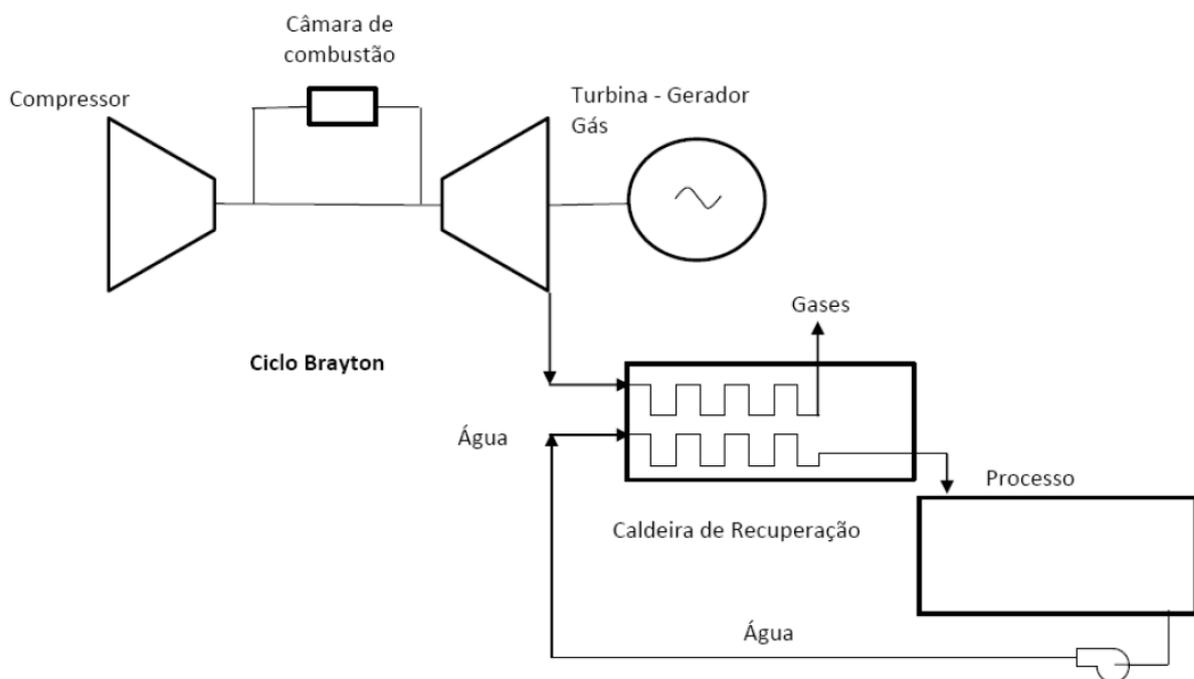
requerem temperaturas elevadas, e é convencionalmente encontrado em ciclo a vapor (ciclo Rankine, conforme ilustra a Figura 2.12). (PRIETO, 2003)

Figura 2.8 – Cogeração a ciclo Rankine montante



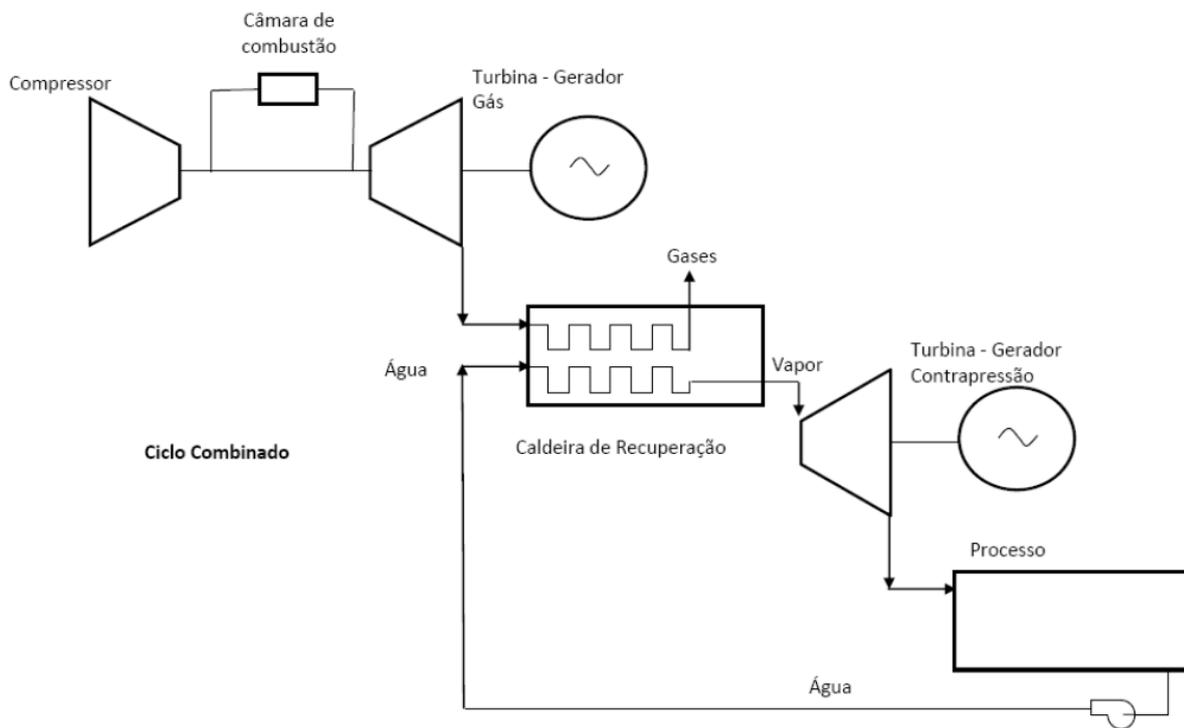
Fonte: (PARO, 2011, p. 26)

Figura 2.9 – Cogeração a ciclo Brayton montante



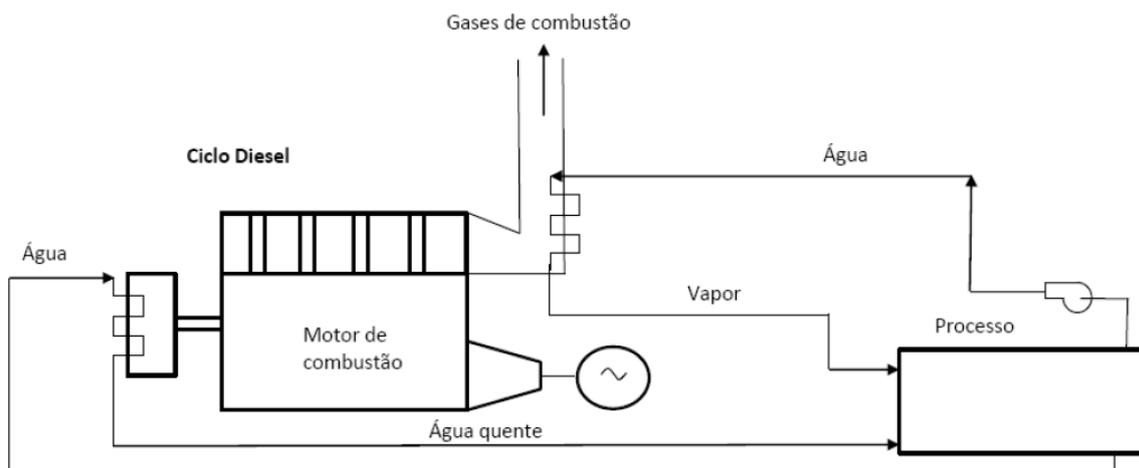
Fonte: (PARO, 2011, p. 27)

Figura 2.10 – Cogeração a ciclo combinado



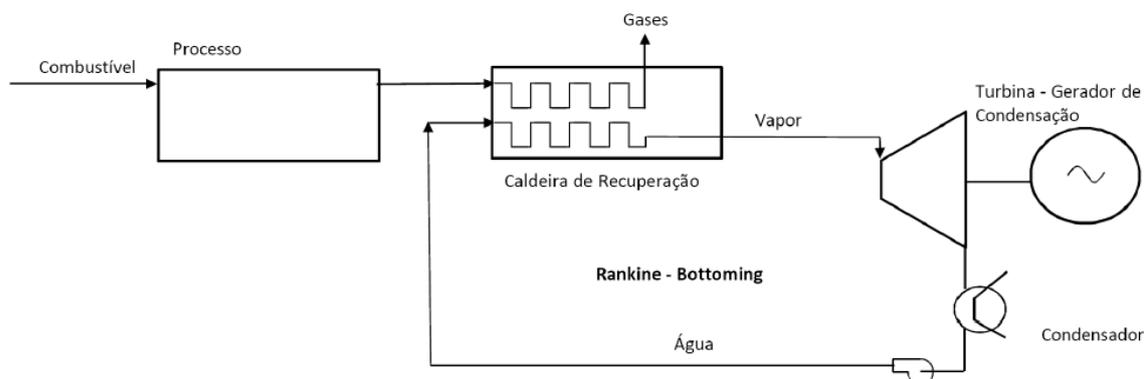
Fonte: (PARO, 2011, p. 27)

Figura 2.11 – Cogeração a ciclo Diesel



Fonte: (PARO, 2011, p. 28)

Figura 2.12 – Cogeração a ciclo Rankine jusante



Fonte: (PARO, 2011, p. 26)

Legislação específica e benefícios da cogeração

Mesmo que ainda insuficientes, a legislação brasileira concede benefícios às centrais cogedoras (BARJA, 2006). Especificamente aos casos de cogeração, é permitida ao PIE a comercialização com consumidores de energia elétrica integrantes do complexo industrial ou comercial, aos quais forneça vapor ou outro insumo oriundo do processo de cogeração, mesmo no caso de consumidores caracterizados cativos, conforme o Decreto nº 2.003. Além do mais, é autorizada a venda de energia elétrica para os consumidores livres e para concessionário ou permissionário de distribuição.

A REN da ANEEL nº 21/2000 descreve que a atividade de cogeração contribui com a racionalidade energética, uma vez que possibilita um melhor aproveitamento dos combustíveis, apresentando menor consumo total quando comparada à geração individual de calor e energia elétrica, proporcionando benefícios para a sociedade. Foram estabelecidas, por meio dessa Resolução, as condições e requisitos mínimos para enquadramento de qualificação das centrais cogedoras para fins de participação nas políticas de incentivo a cogeração. Dentro os benefícios econômicos das centrais de cogeração qualificada, conforme descrito na seção 2.1.3.1, está o desconto das tarifas de uso da rede (REN da ANEEL nº 77) a isenção de aplicação em pesquisa e desenvolvimento do setor elétrico (Lei nº. 9.991/2000). (ANEEL, 2000)

A Tabela 2.3 apresenta o número de usinas classificadas como cogeração qualificada, com destaque na descrição dos combustíveis associados à biomassa, associando a quantidade total de usinas e o segmento industrial, no ano de 2016.

Tabela 2.3 – Número de usinas enquadradas como cogeração qualificada

Tipo de combustível	Biocombustível	Nº de usinas	Cogeração qualificada
Biomassa	Bagaço da cana-de-açúcar	394	22
	Casca de arroz	12	0
	Capim de elefante	3	0
	Biogás	2	0
	Óleo vegetal	2	0
	Licor negro	17	2
	Resíduos florestais	51	0
	Gás de alto forno	10	2
	Carvão vegetal	7	0
	Lenha	1	0
Fóssil	Diversos	2363	59
Total		2468	85

Fonte: BIG (ANEEL, 2016)

A Tabela 2.3 indica que apenas 3,4% das usinas operam como cogeração qualificada, o que representa um número relativamente baixo de unidades frente a grande quantidade de fontes geradoras. Isso demonstra o desinteresse e/ou a dificuldade dos agentes geradores em obter a qualificação das centrais de cogeração, o que supostamente culmina na limitação e não aproveitamento de todo potencial energético do combustível.

Por outro lado, Paro (2011) afirma que a grande maioria das plantas industriais atuantes como geradoras termelétricas aplica a cogeração de energia, e, mais precisamente, nos setores industriais sucroalcooleiras e de papel e celulose, pode-se afirmar que 100% das plantas empregam a cogeração de energia, isto é, aplicação conjunta de geração eletricidade e aproveitamento térmico. Não obstante, para que estas tenham o enquadramento na modalidade de cogeração qualificada é necessário o atendimento dos requisitos mínimos de racionalidade energética, conforme predispõe a REN da ANEEL N° 21 (apresentada no Apêndice A).

Por fim, é válido salientar que as centrais de geração que utilizam quaisquer combustíveis provenientes da biomassa, como, por exemplo, a casca de arroz, gozam dos mesmos benefícios dados à cogeração qualificada, mesmo que não atendam a REN da ANEEL N° 21.

2.1.6 Estado da arte – geração distribuída proveniente da casca de arroz

Em virtude da grande relevância dos temas de GD, cogeração, energias renováveis e biomassa, muitos trabalhos têm sido publicados, tanto no meio acadêmico como em outras instituições associadas a estes temas. Nesta revisão bibliográfica, buscou-se apresentar os trabalhos que tivessem correlação direta ou indireta com a geração de energia através da conversão energética da casca de arroz, inseridos nos contextos da exploração e potencialidade, tecnológico, econômico, social e ambiental. Os trabalhos relacionados nesse item não compõem a totalidade das pesquisas associadas ao tema em estudo, entretanto, são aqueles onde se encontrou maior afinidade ou complementaridade com o tema desta dissertação.

Alguns estudos apresentam o potencial de geração de energia elétrica tanto a nível regional quanto a nacional, por meio da casca de arroz, de acordo com a perspectiva de expansão apresenta na seção 2.1.2.1. Em Mayer e Hoffmann (2014) é estimado o excedente de casca de arroz produzido no estado do RS e o potencial de geração descentralizada de energia elétrica. De acordo com os autores, há 230 indústrias de beneficiamento de arroz no estado que produzem o equivalente a 755 mil toneladas por ano de casca de arroz em excedente. Além disso, através da utilização de um software, baseado em um Sistema de Informação Geográfica (SIG), foi apresentado um potencial de geração de 79,5 MW e 322,7 GWh por ano, o que evitaria a emissão de 13,12 milhões de toneladas de CO₂ por ano. Em Pretz (2001), estimou-se o potencial de geração no estado do RS entre 100 e 120 MW por meio de centrais termelétricas regionalizadas e de maior potência – ressalta-se, no entanto, que o autor desconsiderou na análise o já atual aproveitamento energético. Em Henriques (2009) foi demonstrado o potencial para geração de energia elétrica no Brasil com resíduos de biomassa através da gaseificação; o autor estima que apenas da casca de arroz é possível o país dispor de uma potência instalada de 472,6 MW e fornecimento de energia 4,14 TWh no ano. Em âmbito internacional, Carlos (2007) apresenta um estudo que aponta para uma potencialidade de geração de energia no sudeste asiático em 16,72 GW. A região é considerada uma das mais importantes do mundo, tanto em nível de produção como exportação de arroz (detém cerca de 25% da produção mundial e possui mais de 100.000 engenhos em operação).

Diferentes tecnologias podem ser utilizadas para conversão energética da casca de arroz para geração de energia elétrica, em conformidade com os processos de transformação apresentados na seção 2.1.2.1. Com relação aos processos termoquímicos para geração de

energia elétrica, é possível encontrar estudos referentes à combustão direta da casca – conforme apresenta Sathitruangsak et al. (2009), Sookkumnerd et al. (2005). A casca carbonizada, considerada a sobra do processo de geração, possui em média 18% do peso da casca, dispõe de um elevado teor de sílica (maior que 90%), e tem aplicação em vários ramos da indústria, tais como eletrônica, construção civil, cerâmica, indústria química, fabricação de células fotovoltaicas, etc. (FOLETTTO, 2005). Portanto, além de geração de energia elétrica, há disponibilidade de produção e comercialização de um novo subproduto.

Através da gaseificação é possível encontrar estudos com tecnologias de leito fixo e fluidizado – conforme apresenta Henriques (2009) e Ângulo (2002). Abe et al. (2007) demonstraram que, por meio do processo de gaseificação de leito fixo, para produzir 1 kWh são necessários 2 kg de casca de arroz. Em Yin et al. (2002) através de leito fluidizado, foi necessário de 1,7 a 1,9 kg para produzir 1 kWh. Natarajan et al. (1998) concluem que, devido às características do gaseificador, a tecnologia associada ao leito fluidizado é a mais eficiente. Muito embora o uso da gaseificação como processo para obtenção de energia não é tão desenvolvido quanto o uso da combustão, a eficiência na conversão pode ser superior, conforme apresenta o estudo de Quaak (1999) comparando centrais de geração de 1 MW e 5 MW.

Diversos estudos vêm sendo desenvolvidos para aplicação da casca de arroz pelo método da pirólise, gerando bio-óleo, gases e resíduos sólidos, conforme apresentado em Almeida (2010) e Chen et al. (2011), porém ainda em fase de desenvolvimento comercial.

Com relação aos processos biológicos, encontram-se estudos referentes à digestão anaeróbica, onde microrganismos acabam convertendo biomassa em biogás – conforme apresenta Angelidaki et al. (2010) e Lei et al. (2010). De acordo com Manan (2012) há vários métodos de pesquisa sobre o pré-tratamento com objetivo de aumentar a digestibilidade da biomassa, incluindo o pré-tratamento alcalino, que possui maior eficácia na biomassa lignina, como a casca de arroz. Há ainda estudos com foco na produção de hidrogênio, por meio da fermentação da casca de arroz, conforme apresentado em Cheng et al. (2011). Embora relativamente novos, são estudos considerados promissores.

Apesar da existência de diversos tipos de tecnologia para conversão energética, a combustão direta da casca, através da aplicação do ciclo Rankine, é o método mais difundido e aplicado atualmente no Brasil. Dentre os fatores que levam a essa utilização, segundo Mayer e Hoffmann (2014), são: tecnologia de domínio nacional, simplicidade e flexibilidade de operação, confiabilidade e rendimento. Ainda, de acordo com Mai Thao et al. (2011), a

eficiência de geração de eletricidade dessa tecnologia, para usinas com capacidade superior a 2,5 MW é relatada em na faixa de 15 a 31% enquanto que a de pequena escala (inferior a 1 MW) é de cerca de 10%.

Alguns estudos avaliam a aplicabilidade de sistemas de geração de energia por meio da casca de arroz, de forma análoga com a proposta desta dissertação. Avaliando o potencial regionalizado, Hoffmann (1999) propõe um método avaliativo de geração de energia em pequena escala considerando fundamentos tecnológicos, viabilidade econômica e disponibilidade da biomassa. Constatou-se que o método é aplicável em projetos de geração termelétrica, especialmente na configuração de autoconsumo em empresas que utilizem os resíduos próprios, próximos, ou em conjunto com outras unidades, o que também abre possibilidade para a gestão ambiental dos resíduos através da geração biotermoeletricidade. Mayer (2008) desenvolveu um estudo sobre uma Microcentral Térmica (MCT), porém limitada a potência instalada de 300 kW, onde demonstrou que utilizando a sobra da casca de arroz em um engenho é possível torná-lo autossuficiente em energia elétrica, considerando um sistema com FUE de 10%. Em outro estudo, Mayer (2009) realizou uma abordagem considerando aspectos econômicos e ambientais de MCT com potências menores que 800 kW em engenhos e unidades de beneficiamento de arroz no estado do RS. A metodologia foi comprovada por meio de um estudo de caso, abordando também a análise da sensibilidade de resultados, alterando diferentes variáveis em função do grau de incerteza associado – na análise foi considerada apenas a ótica financeira. Esses estudos sugerem a utilização do combustível no próprio local de sua produção, uma vez que a elevada densidade da casca e o custo com o transporte são variáveis que tem influência direta na viabilidade econômica do empreendimento; além disso, destacam que uma das características diferenciais dessas aplicações é o elevado valor do FU em função da disponibilidade constante da biomassa. Tais constatações auxiliaram na delimitação do tema, como também no ponto de partida para implementar a proposta desta dissertação.

No que se refere ao potencial e possibilidade de cogeração de energia em engenhos de arroz, Mayer e Hoffmann (2014) constaram que todas as indústrias de beneficiamento dispõem de sistema para secagem para diminuição do índice de umidade dos grãos, fazendo uso de energia térmica em forma de calor para atendimento do processo. Ademais, 57% dos engenhos são classificados como beneficiadores com parboilização, isto é, são unidades que utilizam energia térmica no processamento e obtenção desse específico produto final. Portanto, para atendimento dessa demanda térmica e, complementarmente, produção de

energia elétrica, é possível desenvolver um sistema de cogeração. É válido salientar que, convencionalmente, nos processos de secagem e parboilização, a casca de arroz é o material combustível utilizado na fornalha, e por isso, quando há combinação dessas atividades, até 30% do volume total de resíduo já é consumido. Costa (2013) ilustra um sistema de cogeração de energia a base da casca de arroz, sendo que a energia térmica residual é fornecida ao processo para obtenção de óleo de arroz.

2.2 APOIO À DECISÃO MULTICRITERIAL

Nesta seção, o processo decisório é contextualizado, abordando e descrevendo os principais métodos multicriteriais de apoio à tomada de decisão, tendo como aplicação a seleção das fontes de geração de energia elétrica e cogeração. Posteriormente, são apresentados os principais trabalhos relacionados ao tema em estudo, dando ênfase a aplicação dos diferentes métodos, bem como abordando os principais critérios e subcritérios de sustentabilidade. Essa revisão embasará e fortalecerá o desenvolvimento da metodologia proposta nesta dissertação.

2.2.1 Introdução ao processo decisório

Uma decisão é tomada na medida em que se tem mais de uma alternativa para o tratamento ou resolução de um problema. Desta forma, quando se escolhe realizar ou deixar de realizar algo tendo alternativas diversas, como, por exemplo, no plano de crescimento, nas políticas de desenvolvimento, na execução estratégica, dentre outras circunstâncias, busca-se a tomada de decisão. Ela também é considerada um comprometimento com a ação levando-se em conta os recursos disponíveis. Os tomadores de decisão, comumente denominados Agentes de Decisão (AD), são indivíduos ou grupo de indivíduos que geram parâmetros, opiniões e definem a escolha entre as alternativas. (ROY, 1996)

A tomada de decisão é uma atividade intrinsecamente complexa e potencialmente das mais controversas uma vez que se tem naturalmente de escolher alternativas de ação, considerando os diferentes pontos de vista e as multiplicidades de fatores que tem influência direta e indireta nos resultados. (BANA E COSTA, 1988)

Uma boa decisão, de acordo com Duarte (2011), deve ter sua consequência lógica referenciada pelo objetivo principal, pelo conhecimento das grandezas envolvidas e de suas relações, e pelas alternativas disponíveis para a decisão.

Quando alguma decisão está baseada em apenas um parâmetro, o modelo é designado monocritério. No entanto, em se tratando de problemas relacionados ao planejamento energético, que é caracterizado normalmente por múltiplos parâmetros de decisão, o modelo monocritério não atende a essas condições, uma vez o mesmo ignora a existência de múltiplos objetivos. Desta forma, o problema em que se apresentam pelo menos dois objetivos simultâneos que não podem ser combinados, ou critérios para escolha de um curso em ação, é denominado de um problema decisão multicritério. (CAMPOS, 2011)

Barin (2012) ressalta que nos últimos anos houve uma significativa mudança em processos decisórios que envolvam problemas vinculados ao planejamento e gerenciamento de energia elétrica. As decisões monocritérios relacionadas apenas ao critério econômico passam a dar lugar às análises multicritérios, considerando fatores de natureza social e ambiental. Muito embora a predominância das escolhas tecnológicas, na grande maioria dos casos, é dada pela ótica econômica. Adotando os métodos multicritérios, portanto, obtém-se a solução mais satisfatória que tende a incorporar de forma objetiva a preferência dos Agentes de Decisão (AD) visando a uma análise global do processo decisório.

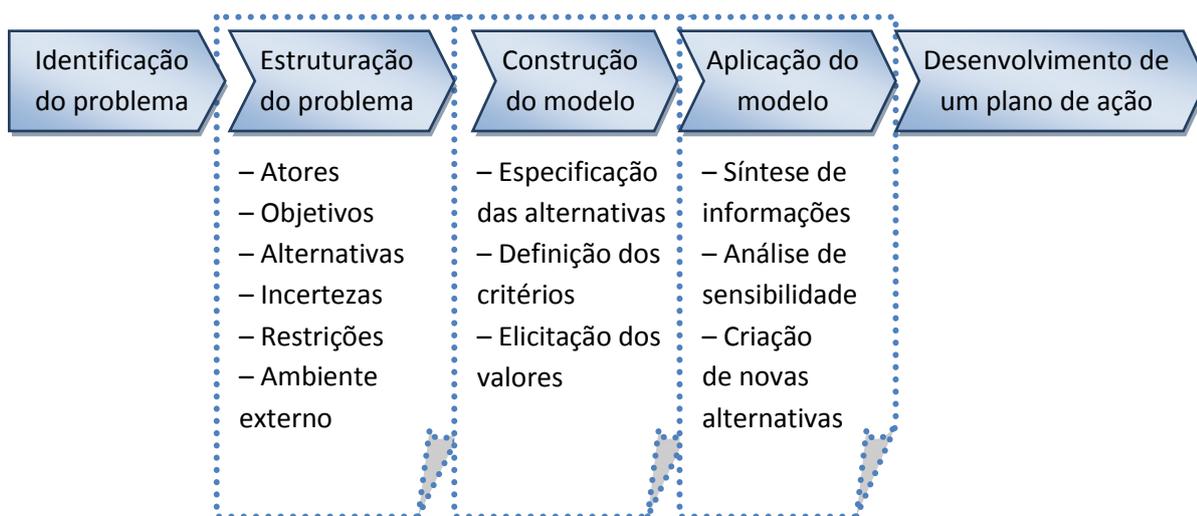
No problema de decisão multicritério, normalmente, não existe nenhuma solução ou ação que seja a melhor para todos os critérios, simultaneamente. Por isso, a tomada de decisão busca resolver o dilema dos critérios conflituosos, cuja presença impede a existência da solução ótima e conduz à busca pela solução de melhor compromisso, ou conjunto de soluções aceitáveis que são superiores às demais. (ZELENY, 1982) Tais soluções aceitáveis são denominadas Pareto-ótimas ou eficientes. A escolha de uma solução eficiente particular, portanto, depende das características próprias do problema e é atribuída ao AD (ARROYO, 2002).

O Apoio Multicritério à Decisão (AMD), então, estabelece um conjunto de métodos e técnicas para auxiliar não somente as pessoas ou organização na resolução de problemas, como também dar suporte em todo o processo de decisão multicritério, de forma que tornem claros todos os elementos da decisão, ora subjetivos em função das preferências, e consequências das ações potenciais (ALMEIDA, 2011; ALMEIDA e COSTA, 2003). Assim sendo, estes métodos não têm como finalidade impor uma ideia ou obrigação de definição e escolha de uma possível solução, até mesmo porque não há uma única resposta correta para o problema, mas sim uma escolha apropriada para cada AD, de acordo com a sua avaliação e preferência diante dos inúmeros fatores dispostos no problema de decisão (BELTON e STEWARD, 2002).

O processo de decisão, de acordo com Bana e Costa (1988), pode ser dividido em duas etapas: a análise do sistema em estudo, determinando as possíveis alternativas e ações, e a avaliação dos critérios para a tomada de decisão final. A primeira contempla a identificação, caracterização, hierarquização dos principais intervenientes e a explicitação das alternativas de decisão, às quais se pretende comparar. A segunda é denominada a síntese, tendo como finalidade o esclarecimento da escolha, por meio da utilização de métodos multicriteriais, para apoiar a modelagem das preferências dos atores e sua agregação.

De uma forma mais detalhada, para Belton e Steward (2002), as fases do processo decisório, conforme ilustra a Figura 2.13, compreendem: a identificação inicial de um problema, a sua estruturação, a construção e uso de um modelo para informar e incentivar a análise, e, finalmente, o desenvolvimento de um plano de ação.

Figura 2.13 – Modelo contemplando as fases e as variáveis de um processo decisório



Fonte: próprio autor com base em DUARTE (2011)

Muito embora sejam distintas, as fases apresentadas no modelo de Belton e Steward (2002) estão intimamente relacionadas. A primeira etapa do processo de decisão tem por objetivo reunir todos os aspectos e informações relevantes com a finalidade de estabelecer os participantes do processo e fornecer um diagnóstico da situação problemática. Tais questões são analisadas na estruturação do problema, formulando as possíveis alternativas para atingir os objetivos – sendo estas associadas aos valores definidos pelos AD, bem como as incertezas, restrições e a influência do ambiente externo. Durante a construção do modelo, são estudados os critérios a serem adotados, as diretrizes e consequência das alternativas, bem

como a sua comparação de forma sistêmica e transparente. As análises de resultados, como também implementação de resultados, através do desenvolvimento de um plano de ação, são as fases subsequentes. Por fim, é importante ressaltar a presença de uma possibilidade de refinamento do modelo, buscando-se o aperfeiçoamento e a melhor adaptação deste para a situação problemática específica.

2.2.2 Métodos multicriteriais de apoio à decisão

Conforme descrito na seção 2.1.1, o AMD, surgido na década de 60 (ROY, 1968), teve como finalidade auxiliar o AD a resolver problemas com objetivos conflitantes, além de suportar todo processo de decisão. Baseando-se nos reais interesses dos agentes, foram desenvolvidos ao longo do tempo diversos métodos de apoio à decisão, incorporando procedimentos distintos e a visão multidimensional dos problemas. Portanto, em geral, os problemas de otimização multiobjetivo são compostos de duas etapas: a busca de soluções (sendo de responsabilidade do método) e a tomada de decisão (responsabilidade do AD) (GARCIA, 2005).

Na literatura existem diversos métodos e suas aplicações estão estritamente relacionadas com a natureza das informações dos problemas. Roy (1996) e Belton e Steward (2002) identificam seis problemáticas de decisão:

- Problemática de escolha: direciona-se a investigação no sentido de encontrar a melhor alternativa ou conjunto de alternativas dentro do espaço de possibilidades, visando à escolha final de uma única ação. Trata-se, portanto, de um procedimento de seleção.

- Problemática de classificação: busca-se classificar as alternativas em conformidade com classes ou categorias pré-definidas, resultando em um processo de triagem e classificação das ações;

- Problemática de ordenação: as alternativas são ordenadas de acordo com as preferências, de forma a gerar uma hierarquia.

- Problemática descritiva: apoia a decisão por meio da descrição das alternativas e suas respectivas consequências, resultando em um processo cognitivo, de uma maneira sistêmica e formal.

- Problemática de *design*: buscam-se e criam-se mais alternativas ainda não descobertas, através das metas e aspirações pré-definidas, como também identificando as alternativas existentes.

– Problemática de portfólio: tem por objetivo a seleção de um conjunto de alternativas, provenientes do espaço de possibilidades, levando-se em conta além da característica individual de cada opção, sua interação ou a maneira como ela se relaciona com o conjunto.

Almeida (2011) e Vincke (1992) estabelecem uma classificação básica da metodologia de multicritérios:

– Métodos compensatórios: é permitida a compensação entre os critérios analisados por uma dada alternativa, considerando *trade off* entre eles. Assim sendo, são métodos que agregam os critérios de uma função, criando um único critério através de uma síntese dos originais, estabelecendo um valor para cada alternativa. Tais métodos, são também denominados de métodos por critério único de síntese.

– Métodos não compensatórios: não há de compensação entre os critérios, i.e., a relação de *trade off* é inexistente, ocorrendo apenas uma prevalência ou subordinação das alternativas. A solução ou conjunto de soluções representam as preferências estabelecidas pelo decisor, de forma a orientá-lo na escolha final. São também denominados de métodos de sobreclassificação.

Dentre os métodos compensatórios destacam-se: *Multi-Attribute Utility Theory* (MAUT) e *Multi-Attribute Value Theory* (MAVT) (KEENEY e RAIFFA, 1976); *Simple Multi-Attribute Rating Technique* (SMARTS) e a sua variante SMARTER (EDWARDS e BARRON, 1994); e *Analytic Hierarchy Process* (AHP) (SAATY, 1980). Estes são métodos que foram desenvolvidos pela escola americana.

Dentre os métodos não compensatórios destacam-se a família de métodos *Elimination Et Choix Traduisant la Réalité* (ELECTRE) (ROY, 1991) e a família de métodos *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation* (PROMETHEE) (BRANS et. al., 1984). Estes métodos e famílias foram desenvolvidos pela escola francesa.

Atualmente, na literatura há um crescente interesse pela aplicação de metodologias multicriteriais, encontrando ainda métodos híbridos, que utilizam conceitos de duas ou mais abordagens. O *Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique* (MACBETH) (BANA E COSTA e VANSNICK, 1994) é um exemplo que aplica os conceitos de agregação (escola americana) e subordinação (escola francesa), de acordo com Salomon (2004).

Introduzida por Kenney e Raiffa em 1976, o MAUT, baseando-se na extensão natural da teoria da utilidade (FISHBUM, 1970), apresenta uma estrutura axiomática e uma lógica

compensatória entre os critérios, de modo a se obter uma função de síntese que agregue todos os critérios em uma única função analítica que deve ser otimizada, baseada nas preferências do decisor (KEENEY e RAIFFA, 1976). A diferença entre a utilização do MAUT e o MAVT é dada principalmente pela forma de tratamento da consequência de cada alternativa: quando há uma situação de incerteza, envolvendo a probabilidade na obtenção das consequências é usado o MAUT; caso contrário, utiliza-se o MAVT.

O SMARTS foi desenvolvido com o objetivo de prover uma maneira simplória os princípios da teoria da utilidade multiatributo. Tem como base o uso de função linear para avaliação de critérios, simplificando as hipóteses no processo da análise, além de considerar procedimentos para o decisor arbitrar pesos às possíveis alternativas, mediante uma escala pré-definida. Já a SMARTER, variante do método anterior, é conduzida nas mesmas diretrizes, exceto para a atribuição de pesos, situação em que estabelece um procedimento para transformar a informação de ordem de critérios em pesos, i.e., sem avaliação adicional do decisor. (EDWARDS e BARRON, 1994)

O AHP, desenvolvido por Saaty entre os anos de 1971 a 1975 (SAATY, 1980), é um método caracterizado pelo conceito de modelagem de preferência que tem como premissa o julgamento e a conversão dos critérios em pesos, a fim de que se possam hierarquizar os objetivos por meio de comparações que permitam a tomada de decisão.

Por sua vez, no grupo dos métodos de sobreclassificação, destacam-se a família ELECTRE e PROMETHEE, sendo considerados mais flexíveis, sem compensação entre os critérios e que consideram a incomparabilidade entre as alternativas. Os métodos ELECTRE, desenvolvidos por Roy, utilizam dois conceitos básicos para a construção das relações de sobreclassificação: concordância e discordância. Fazem parte desta família os seguintes métodos: ELECTRE I, ELECTRE IS, ELECTRE II, ELECTRE III, ELECTRE IV e ELECTRE TRI (ROY, 1996). Já os métodos PROMETHEE, desenvolvidos por Brans et. al. (1984), constroem uma relação de sobreclassificação valorada, o que facilita o entendimento do decisor com relação ao método e ao processo decisório. Da mesma forma, a família de métodos PROMETHEE, desenvolvidos por conta das mais diferentes problemáticas, inclui: PROMETHEE I, PROMETHEE II, PROMETHEE III, PROMETHEE IV, PROMETHEE V, PROMETHEE VI e PROMETHEE GAIA.

Por fim, com relação aos métodos híbridos, Bana e Vansnick, em 1994, desenvolveram o método MACBTEH (BANA E COSTA e VANSNICK, 1994). Com base no modelo AHP, o MACBTEH se propõe a ser um método mais robusto, atribuindo uso de

matrizes de comparação paritária mantendo um grau de consistência. Desta forma, através de modelos de programação linear, são determinadas funções de valor para representar o julgamento dos AD. Dentre as diferenças com o método AHP está a escala utilizada nos julgamentos e validação, além da verificação de coerência teórica e semântica.

A seguir são apresentados os principais trabalhos relacionados à utilização de critérios e métodos multicriteriais para seleção de fontes de GD.

2.2.3 Estado da arte – utilização de métodos multicriteriais para seleção de sistemas de geração distribuída

Na literatura há uma grande predominância de pesquisas envolvendo decisões monocriteriais voltadas principalmente ao quesito financeiro e à viabilidade econômica de empreendimentos de GD, muito embora seja possível constatar a expansão e a maior popularidade da análise multicriterial para tomada de decisão. Ademais, é válido salientar que os primeiros estudos com múltiplos objetivos surgiram a partir da década de 70, como em Blair (1979). Em empreendimentos que buscam a inserção dos pilares da sustentabilidade, sobretudo em casos relacionados à seleção de arranjos tecnológicos, como é o propósito desta dissertação, é fundamental a utilização dos métodos multicriteriais de apoio à tomada de decisão, tendo em vista os diferentes interesses dos AD e os conflitos dos critérios técnicos, econômicos, sociais e ambientais que circundam o tema. Além disso, dada a complexidade da questão, é importante que se tenha a clareza, consistência e fundamentação das possíveis escolhas. Nesta seção serão apresentados os principais trabalhos e aplicações, abordando especialmente os critérios e métodos de análise, uma vez que servirão de referência para a metodologia do trabalho.

Wang et al. (2009) revisam detalhadamente os critérios e métodos de análise para seleção de projetos de geração de energia. Foram elencados os principais critérios de natureza técnica, econômica, ambiental e social. Critérios como eficiência e eficiência exergética, relação entre disponibilidade de energia primária e demanda de eletricidade e/ou calor, segurança no que tange as regulamentações ambientais e mudanças tecnológicas, confiabilidade do sistema, e maturidade tecnológica, são considerados os principais critérios para análise técnica. Já o investimento, custo de operação e manutenção, vida útil da instalação, custo do combustível e análises econômicas, como o *payback*, são os critérios econômicos mais utilizados. Com relação aos critérios sociais e ambientais destacam-se: aceitação e benefícios sociais; criação de empregos; redução de emissão de partículas a

atmosfera, como o CO₂, CH₄, CO, SO₂ e NO_x; área utilizada para instalação; e poluição sonora. Nesta revisão, Wang et al. (2009) descreve que o critério mais considerado nas análises é o investimento, seguido de mitigação de emissões de CO₂ à atmosfera.

De uma maneira mais generalista, outros trabalhos apontam indicadores de sustentabilidade a serem considerado na escolha das tecnologias para geração de eletricidade, como em Strezov (2010) – dando ênfase para biomassa – e Strezov (2009) – abordando quatro fontes renováveis como a eólica, solar, geotérmica e hídrica. Na visão do autor, os principais indicadores de sustentabilidade são: eficiência; emissão de gases do efeito estufa; disponibilidade e limitações tecnológicas; uso da terra e da água; investimento; e impactos sociais.

No contexto da comparação das opções tecnológicas para geração de energia, Antunes (2014) destaca os principais critérios e método de apoio à decisão. Além dos critérios já abordados em Wang et al. (2009), no quesito técnico o autor destaca: a capacidade de geração; a adaptabilidade da tecnologia frente às condições reais de produção; *know-how* técnico local para garantir melhores índices de confiabilidade e continuidade de geração; a fiabilidade da tecnologia, i.e., a capacidade de falha sem consequências catastróficas; o risco técnico da tecnologia; e o *spin-off* técnico, i.e., a existência de aplicação e desenvolvimento tecnológico análogo ao aplicado. No critério econômico, são citados: os custos externos ao empreendimento como os impostos; custos paralelos de infraestruturas como as linhas de transmissão; impacto econômico local, regional, nacional e demais análises de viabilidade econômica. Já nos critérios ambientais e sociais são citados os efeitos sobre o meio ambiente natural, incluindo contaminação do solo, rios, resíduos gerados e poluição visual; impactos globais na ótica das alterações climáticas, aproveitamento bioenergético e sustentabilidade; desenvolvimento local e impactos sociais.

No que se refere aos métodos de análise multicriterial, conforme descrito em Polatidis (2006), apesar de existirem diversos, nenhum deles é considerado o melhor para todos os tipos de situação. Da mesma forma, não existem técnicas melhores ou piores, apenas técnicas que se encaixam melhor para uma determinada situação ou não. O autor salienta que o procedimento de desenvolvimento para tomada de decisão em sistemas de GD e energias renováveis é complexo devido ao envolvimento e influência das partes interessadas, bem como a diversidade dos inúmeros critérios ambientais, sociais, tecnológicos e econômicos existentes e dificuldade de sua operacionalização. Diante dessas premissas, Polatidis (2006) desenvolve uma metodologia para fornecimento de informações e adequação quanto ao uso

dos métodos para o planejamento energético. Dentre os principais pré-requisitos para escolha das técnicas estão: necessidade de atribuição de pesos e valores; informações qualitativas e quantitativas; comparabilidade das ações; rigidez para apresentação de resultados robustos; incluir a diversificação de *stakeholders*, i.e., partes interessadas; facilidade de uso; análise de sensibilidade; variedade de alternativas e critérios; busca de consenso para busca do objetivo global; tratamento de incertezas; hierarquia de escalas. Na construção de parâmetros, devem ser considerados: operacionalização do tema sustentabilidade; modelagem de preferência do AD; diversidade de recursos técnicos; tratamento de incertezas; e declaração de consequências das ações. Conclui-se que não há um método que pode executar superiormente a todos os atributos identificados. No geral, ELECTRE III, *Novel Approach to Imprecise Assessment and Decision Environment* (NAIADE), e PROMETHEE II pareceram ter um desempenho superior para o assunto em questão.

Taha (2013), Pohekar (2003), Wang et al. (2009) e Antunes (2014) revisam os diversos trabalhos sobre decisão multicriteriais, de forma a quantificar, comparar e descrever os métodos utilizados para tomada de decisão, em se tratando da seleção de sistemas para geração de energia. Com relação à tecnologia e seleção de projetos, Pohekar (2003) revisa mais de 90 publicações, onde os métodos mais aplicados são AHP, ELECTRE e PROMETHEE, respectivamente. Por sua vez, Taha (2013) revisa 31 publicações, das quais 7 utilizam AHP, 3 utilizam ELECTRE, 3 utilizam o PROMETHEE, 3 utilizam a lógica *fuzzy* e 15 utilizam outras metodologias. Para Wang et al. (2009) o método mais popular é o AHP, porém cita que diversos outros estudos são encontrados na literatura como: *The Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS), Análise Relacional Gray (GRA), combinação de métodos com a lógica *fuzzy*, ELECTRE e PROMETHEE. Por fim, para Antunes (2014), os métodos mais utilizados para seleção de tecnologias de GD são: AHP, MAUT, MAVT, SMART, ELECTRE, PROMETHEE, *Analytic Network Process* (ANP), TOPSIS, MACBETH e NAIADE.

Alguns estudos apontam para o desenvolvimento de novas técnicas e aprimoramento dos modelos já existentes, integração de métodos, além de exploração da forma de interação com outras disciplinas como a inteligência artificial e a computação evolutiva. Em Barin (2012) é proposto o desenvolvimento de uma metodologia de apoio à decisão multicriterial para seleção dos sistemas de geração de energia elétrica provenientes do biogás de RSU, baseando-se em fatores econômicos, operacionais, ambientais e sociais. O autor descreve sua metodologia fazendo uso da lógica difusa a partir da modelagem de regras e conjuntos *fuzzy*

aplicando a diversos critérios e avaliando também diferentes perspectivas. Por fim, foi verificada a aplicação da metodologia em um estudo de caso em um aterro sanitário. Já em Geldermann (2010) é elaborada outra metodologia considerando modificações no algoritmo PROMETHEE, para avaliação de alternativas de geração de potência elétrica e térmica em uma área municipal na Alemanha. Arce (2015) desenvolve uma metodologia integrando a Análise Relacional Gray (GRA) e outros métodos como TOPSIS, AHP, *fuzzy*, aplicados na análise de ponderação para avaliação de sistemas energéticos sustentáveis. Por sua vez, em Kahraman (2009) é aplicada uma mistura do método AHP e da lógica *fuzzy* para seleção de diferentes tipos de tecnologia de geração de potência elétrica, considerando critérios de natureza econômica, ambiental, social e operacional.

Na literatura também são encontrados diferentes estudos para aplicação de modelos já existentes na seleção de alternativas para geração de energia, de forma semelhante com a presente dissertação. Em Pilavachi et al. (2009) o método AHP é utilizado para seleção entre nove tipos de sistemas de geração de potência elétrica, considerando sete critérios e dezenove cenários. Dentre as opções para geração está a utilização de gás natural, células a combustível e combinações tecnológicas entre eles. Já em Afgan (2002) são apresentadas dez diferentes tecnologias de geração de energia elétrica, com fontes renováveis e não renováveis, e são considerados cinco indicadores de sustentabilidade. Assim, é aplicada a análise multicriterial para seleção da fonte, diante de criação de dez cenários aos quais são atribuídos pesos distintos aos critérios. É possível encontrar outros estudos semelhantes aos apresentados, como em Becalli et al (2003) e Chatzimouratidis et al. (2009), utilizando o método ELECTRE; e Polatidis et al. (2002) e Petros et al. (2009), utilizando o método PROMETHEE e AHP, respectivamente.

Especificamente sobre a utilização da casca de arroz para geração de potência elétrica, em Hoffman (1999) é aplicada uma metodologia multicriterial com o Modelo Aditivo Linear (MAL) para avaliação de geração de potência regionalizada. São avaliadas cinco empresas de beneficiamento de arroz, mediante o estabelecimento de um *ranking* entre elas, considerando nove critérios de avaliação: Taxa Interna de Retorno (TIR), necessidade de potência, localização do depósito do resíduo, capacidade de instalação, acesso à tecnologia, organização e recurso da empresa, distância da rede de distribuição, poluição gerada e evitada. Nesta tese, o autor padronizou a possibilidade de geração elétrica de até 1 MW; no entanto, não foram considerados os tipos de tecnologia para geração, como também os aspectos sociais na análise multicriterial.

Ainda no contexto da geração de energia por meio da biomassa, Oliveira (2015) desenvolveu uma metodologia de análise de risco de projetos utilizando o biocombustível dendê (óleo de palma), na Amazônia, considerando critérios e indicadores de sustentabilidade, agrupando-os em: econômicos, ambientais, sociais e técnicos. Já Fortes (2009) propõe um modelo para avaliação das alternativas de GD constituídas por centrais termelétricas, considerando aspectos sociais, ambientais, tecnológicos e econômicos, como também, características regionais, além de fontes de combustíveis fósseis e renováveis disponíveis.

No quesito cogeração de energia, Balestieri (1994) apresenta uma metodologia de otimização multiobjetiva, considerando critérios técnicos, econômicos e ambientais, para definição de configuração do sistema de cogeração – e não apenas para seleção do tipo de GD, como a proposta desta dissertação. Na tese, o autor utilizou a associação de técnicas de Programação Multiobjetivo, Programação Inteira Mista e Grafos Generalizados. Por fim, este autor aplica a metodologia através de um estudo de caso em indústrias do setor químico e papel e celulose. Nagaoka (2005) analisa a viabilidade econômica de projetos de cogeração de energia em usinas sucroalcooleiras, sob condições de risco, utilizando algoritmos de Redes Neurais Artificiais (RNA). Wang (2008) aplicou um método utilizando lógica *fuzzy* para seleção de sistema de trigerção, i.e., geração combinada de calor e frio, além da geração de potência elétrica. Para isso estudou quatro alternativas tecnológicas de GD (motor Stirling, turbina a gás, motores a gás e células a combustível), baseando-se em dezessete critérios (técnicos, ambientais, financeiros e sociais). A metodologia é aplicada em um estudo de caso num prédio residencial na China, onde são encontradas as soluções, de forma hierárquica.

2.3 RESUMO DO CAPÍTULO

Este capítulo está dividido em dois temas distintos: o potencial da casca de arroz para geração distribuída e o processo de apoio à tomada de decisão baseada em técnicas multicriteriais para seleção do tipo de minigeração distribuída.

Apresenta-se inicialmente a potencialidade da casca de arroz para geração de potência elétrica, térmica e cogeração. Mostra-se os benefícios da geração distribuída no que se refere à complementaridade da geração de potência, diversificação da matriz energética e utilização de combustíveis renováveis. Estão apresentadas também as principais tecnologias associadas à geração e cogeração de energia, demonstrando os benefícios e utilização dos diferentes arranjos, bem como descrevendo os principais incentivos e políticas empregadas. Por fim,

apresenta-se o atual estado da arte do tema no que concerne às pesquisas e trabalhos publicados tanto em nível nacional como em nível internacional.

Por fim, este capítulo realiza uma revisão do processo de apoio à decisão multicriterial. Para isso, buscou-se inicialmente descrever o modelo contemplando as fases e as variáveis de um processo decisório, bem como apresentar os principais métodos e suas características. Finalmente apresenta-se o atual estado da arte no que se refere à aplicação de métodos para seleção do tipo de GD, considerando os critério e subcritérios de sustentabilidade.

3. METODOLOGIA PROPOSTA

Este capítulo descreve o planejamento de pesquisa, a caracterização do problema decisório e a metodologia empregada para a seleção do tipo de minigeração distribuída utilizando a casca de arroz. Para tal é feita a estruturação do modelo, abordando: a forma de obtenção do potencial energético usando casca de arroz; a identificação dos atores do processo decisório; o estabelecimento das possíveis alternativas para minigeração, bem como os respectivos critérios e subcritérios de avaliação, considerando atributos qualitativos e quantitativos; e a construção do modelo final. Por fim, é apresentado e detalhado o método de apoio à tomada de decisão.

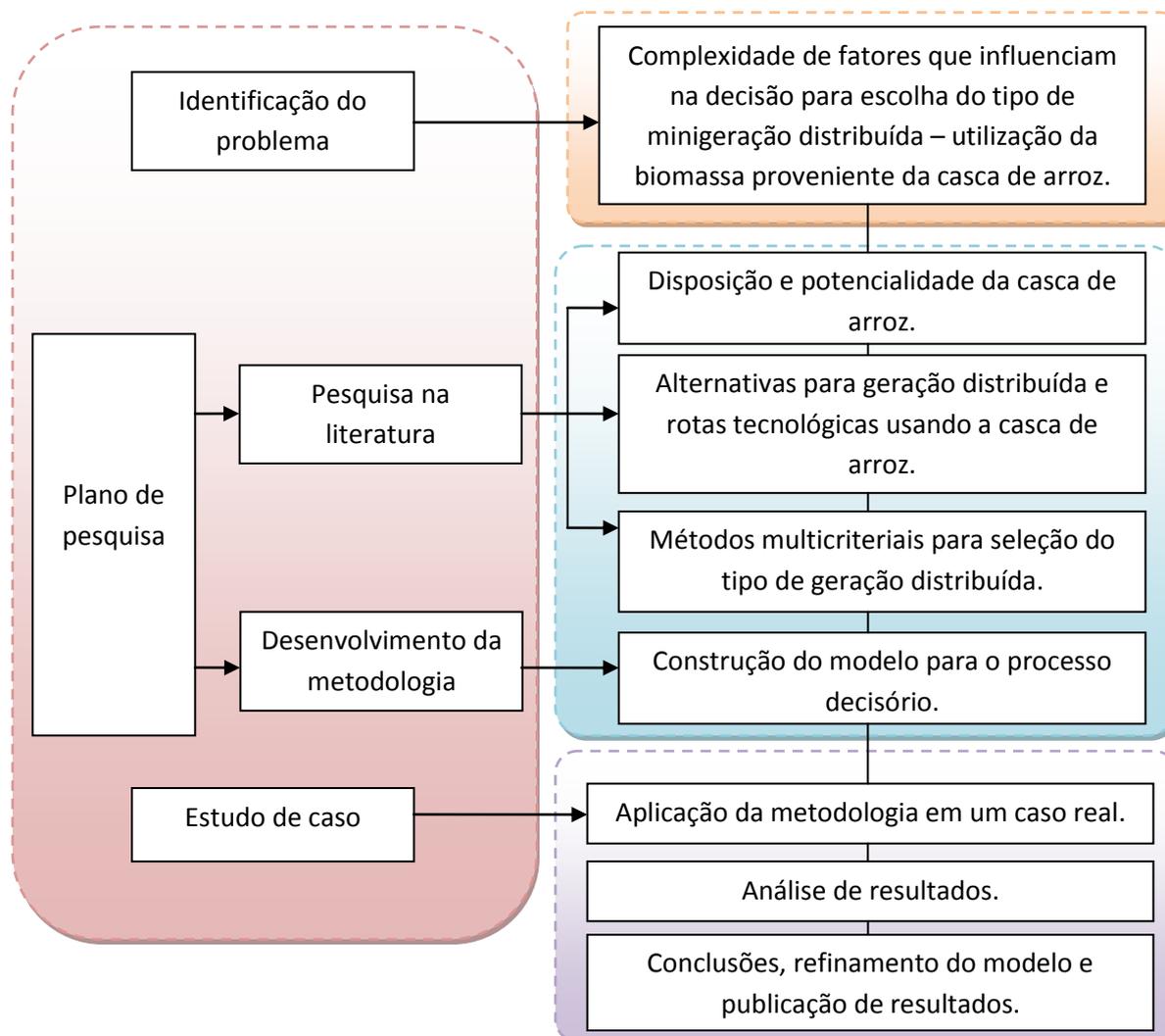
3.1 PLANEJAMENTO DE PESQUISA

A pesquisa, que está voltada para a seleção do tipo de minigeração distribuída utilizando casca de arroz, caracteriza-se como metodológica e propõe a criação de um modelo prescritivo que tem a finalidade de sistematizar a situação problema e auxiliar no apoio à tomada de decisão multicriterial.

Para esta dissertação, o planejamento da pesquisa foi dividido em três etapas: a fase decisória, referente à escolha e delimitação do tema; a fase construtiva, desenvolvendo o plano de pesquisa e constituindo a metodologia; e, por fim, a validação do modelo, por meio da realização de um estudo de caso, e obtenção dos resultados.

A Figura 3.1 ilustra o fluxograma do planejamento de pesquisa usado, descrevendo e organizando as atividades da dissertação.

Figura 3.1 – Fluxograma do planejamento de pesquisa



Fonte: próprio autor

O início do fluxograma da Figura 3.1 remete à identificação do problema a ser detalhado na seção 3.2.1. De uma maneira sucinta, a multidimensionalidade de critérios para a seleção do tipo de minigeração distribuída torna a tomada de decisão uma tarefa complexa. Tal problemática passa a ser inserida em um contexto de oportunidade de geração renovável utilizando a casca de arroz nas indústrias de beneficiamento. Com vista à integração dessas duas áreas distintas, visualizou-se a oportunidade da criação de uma metodologia embasada cientificamente para sanar o problema.

Uma vez entendida a importância e a utilidade do tema, como também estabelecida a sua delimitação, elaborou-se o plano de pesquisa. Através da revisão bibliográfica, referenciada em livros, periódicos, artigos, teses e dissertações, foi possível relatar não

somente a fundamentação teórica para o desenvolvimento do modelo proposto, como também verificar a potencialidade do biocombustível, mapear as alternativas tecnológicas, os métodos multicriteriais adotados em aplicações semelhantes, além dos critérios e subcritérios relevantes. De posse desse conhecimento, desenvolveu-se o modelo aqui proposto para seleção do tipo de minigeração distribuída, com a finalidade de orientar e auxiliar os AD no processo decisório. Para o desenvolvimento do modelo foi necessário agregar o entendimento e estruturação do problema, adequar as possíveis alternativas tecnológicas, mapear os critérios e as partes envolvidas do processo decisório, e finalmente selecionar o método. A partir deste ponto, a pesquisa passa a ter uma estrutura formal e sistemática, atendendo a um método científico estabelecido.

Após o desenvolvimento do modelo, é proposta a aplicação numérica, através de um estudo de caso real em uma indústria de beneficiamento de arroz, a fim de validar a metodologia. Para tal, torna-se necessário fazer a coleta de dados, por meio de planilhas e deliberação de dados, e a modelagem de preferência, por meio de entrevistas diretas com o AD. Por último, a etapa final consiste na apresentação em ordem de prioridade das alternativas e seleção do tipo de minigeração distribuída.

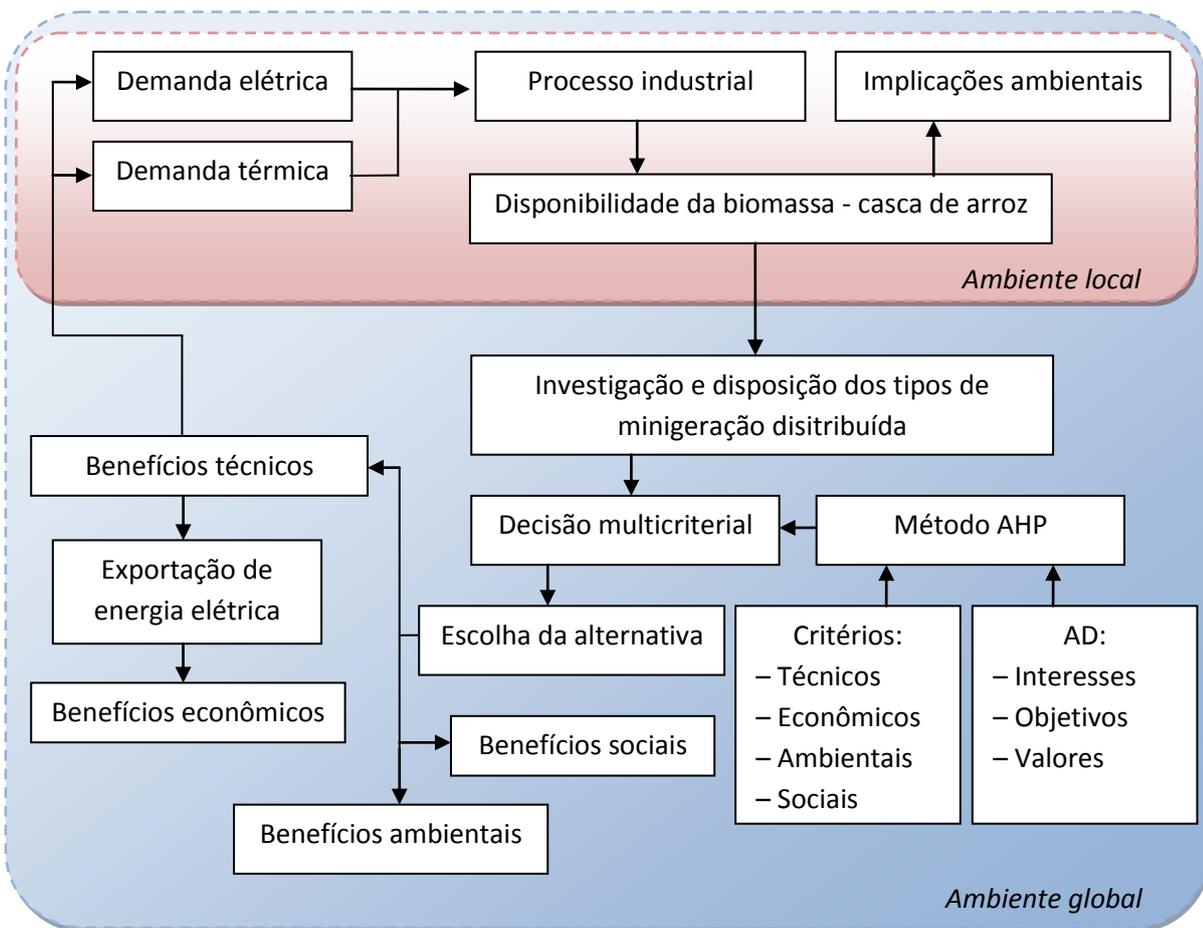
3.2 PROBLEMA DECISÓRIO

Nesta seção, são apresentadas as principais características do problema decisório com intuito de estabelecer a identificação e a compreensão da complexidade do mesmo. A partir da estruturação e ordenação das informações levantadas, propõe-se o desenvolvimento do modelo para orientar de uma maneira geral o processo decisório, como também auxiliar o AD na escolha.

3.2.1 Identificação e caracterização do problema decisório

O entendimento, caracterização e estruturação do problema são fatores essenciais no desenvolvimento de uma metodologia de apoio à tomada de decisão, uma vez que proporcionam uma visão macro e clara da situação, além de facilitar o entendimento e participação dos atores envolvidos. Diante do exposto, a Figura 3.2 apresenta os principais aspectos e características do processo decisório referentes à disponibilidade da biomassa proveniente da casca de arroz e a potencialidade de geração energética sustentável.

Figura 3.2 – Principais aspectos envolvidos no processo decisório em questão



Fonte: próprio autor

Avaliando os aspectos apresentados na Figura 3.2, é possível distinguir as etapas e os possíveis atores e *stakeholders* relacionados ao processo decisório. No ambiente local, compete à empresa de beneficiamento de arroz e à empresa responsável pelo desenvolvimento do projeto elaborar o estudo de disponibilidade dos recursos existentes, i.e., a quantificação da biomassa (casca de arroz) considerando a capacidade de produção anual, a qualidade da casca e vida útil (tempo de produção). Paralelamente, devem ser coletados os dados referentes à demanda energética da planta industrial, tanto no aspecto elétrico quanto térmico. Diante dessas circunstâncias, avalia-se a possibilidade de uso e venda dos excedentes de energia elétrica à concessionária. Por sua vez, na possibilidade de comercialização dos excedentes, compete a concessionária de energia o levantamento da demanda local, a conexão ao alimentador e os possíveis benefícios dessa geração perante o abastecimento e suprimento elétrico. Cabe ainda à empresa de beneficiamento de arroz investigar junto ao órgão político e ao órgão ambiental os incentivos a esta forma de GD, as diretrizes políticas e barreiras, haja

vista os benefícios sociais (avaliados na esfera local, regional e nacional) e ambientais do empreendimento (frente às implicações até então existentes).

No ambiente global, cabe ao especialista a avaliação e investigação dos tipos de minigeração distribuída para atendimento das potências elétrica e térmica. De posse das alternativas, o especialista desenvolve uma metodologia para auxílio à tomada de decisão, bem como a estratégia para solução do problema. Para definição dos critérios de ordem técnica, econômica e socioambiental é interessante coletar informações junto às partes interessadas; além disso, é válido destacar que cada *stakeholder* possui um objetivo distinto no projeto, intimamente o ligado à sua respectiva área de interesse, seja ela social, ambiental, econômica ou técnica. Por outro lado, as próprias alternativas possuem uma série de características de ordem técnica, econômica e socioambiental que as diferenciam.

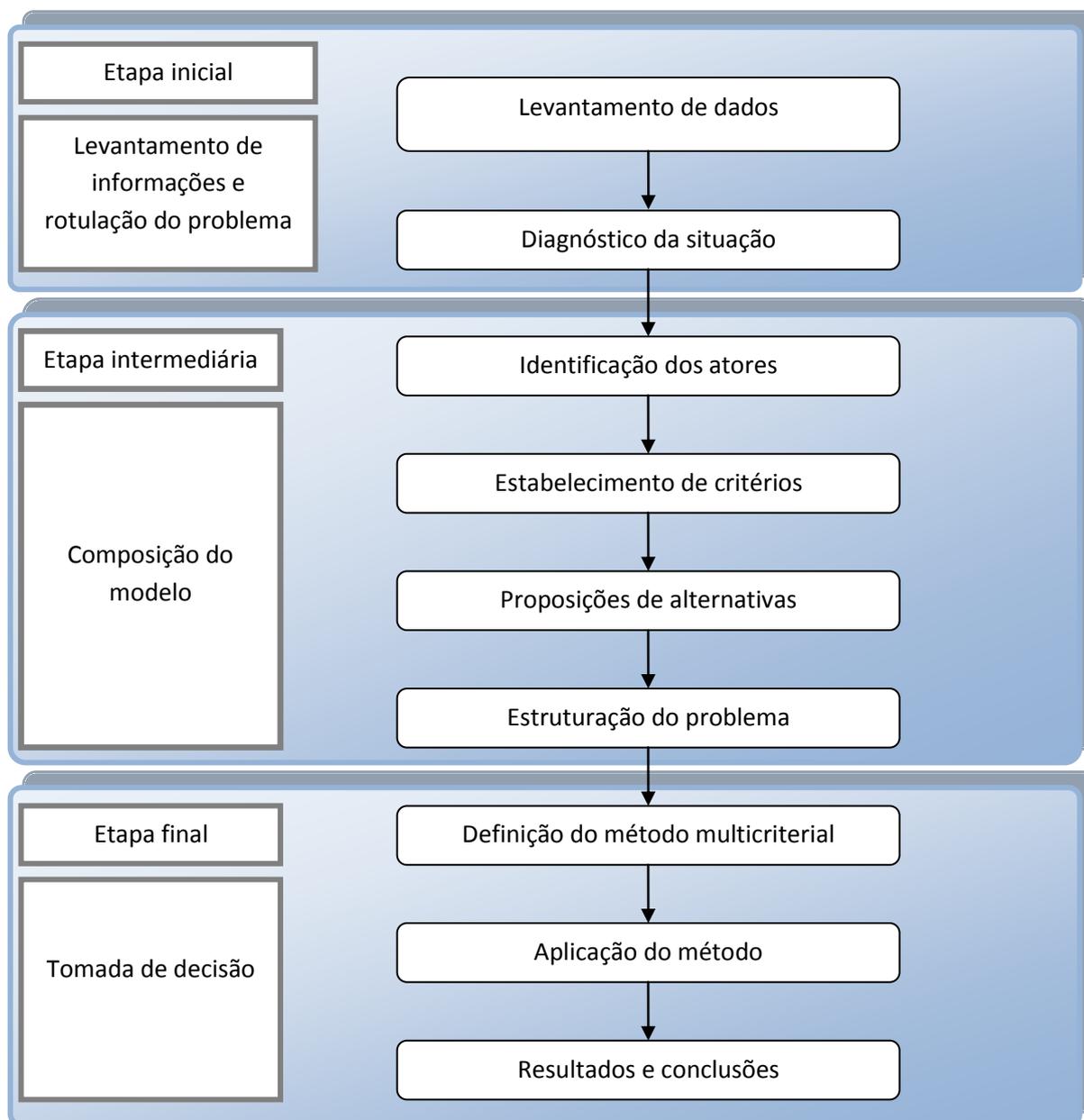
A partir do exposto acima, verifica-se a criação de inúmeros cenários no processo decisório, em virtude da diversidade dos *stakeholders* envolvidos bem como dos critérios de avaliação. Diante da complexidade do problema e da natureza multidimensional dos objetivos, torna-se essencial o desenvolvimento e aplicação de métodos de apoio à tomada de decisão. Finalmente, diante das soluções encontradas, deve-se levar em conta que a execução do projeto só deve ser realizada após a revisão minuciosa de todos os aspectos envolvidos.

3.2.2 Construção do modelo

A proposta do modelo, ilustrado na Figura 3.3, foi constituída tendo como base as etapas do processo decisório. Para esse atendimento foram definidas todas as variáveis da situação (detalhadas na seção 3.3), de forma a garantir a estruturação do problema e, posteriormente, ser aplicado o método de seleção multicriterial (detalhado na seção 3.4).

A etapa inicial no modelo consiste em reunir todos os aspectos e informações relevantes, contribuindo para o estabelecimento do diagnóstico do problema, como também auxiliando a composição do modelo. Assim sendo, por meio do levantamento de dados e verificação da disponibilidade da biomassa na área estudada, estima-se o potencial de GD. A partir da rotulação do problema, na etapa intermediária o modelo é estruturado, definindo os atores do processo decisório, as alternativas tecnológicas e os respectivos critérios de avaliação. Por fim, na etapa final busca-se a solução do problema por meio da aplicação de um método multicriterial de apoio à tomada de decisão.

Figura 3.3 – Etapas da construção do modelo



Fonte: próprio autor

3.3 ESTRUTURAÇÃO DO MODELO

Nesta seção são detalhadas as etapas referentes à identificação e potencialidade de geração, de forma a rotular o problema, partindo então para a composição das variáveis do modelo. Para tal são apresentados os atores do processo de decisão, as possíveis alternativas tecnológicas para GD e os critérios sustentáveis a serem considerados para aplicação do método.

3.3.1 Potencial de geração

Para avaliar o potencial de geração com a casca de arroz, parte-se do princípio que os parques industriais do seu beneficiamento possuem características distintas em função da capacidade de produção. Por consequência, a disponibilidade de biomassa residual para geração varia em cada situação, como também a demanda de energia elétrica e térmica da planta considerada. Evidencia-se, diante disso, a criação de diversos cenários característicos de cada realidade industrial. Além do mais, cada empreendimento possui peculiaridades que acabam influenciando na capacidade de geração e, por consequência, na seleção do arranjo tecnológico. Ainda assim, independente do perfil industrial e da vocação de geração, recomenda-se, inicialmente, o estabelecimento de dois pontos fundamentais: a oferta da biomassa residual e a demanda energética – elétrica e térmica. Estes aspectos servem de base a todo o trabalho subsequente desta dissertação.

Os dados e as informações iniciais são obtidos por meio do preenchimento de um questionário específico, apresentado no Apêndice B. A reunião dos dados coletados permite o estabelecimento do potencial real de geração das potências elétrica e térmica a partir da casca de arroz e a comparação destas informações com a demanda e consumo energético da indústria. A partir disso, são estabelecidas as características da planta e as possibilidades de geração do empreendimento.

Modelo numérico para cálculo do potencial energético disponível

Por meio da proposta e aplicação de um modelo numérico, estima-se o potencial quantificado da geração de potência, proveniente da utilização da casca de arroz. Tal modelo estabelece a conversão energética disponibilizada pela biomassa e as potências elétrica e térmica. Verifica-se, logicamente, que a capacidade de geração está diretamente vinculada com a abundância e disponibilidade da casca de arroz da indústria local de beneficiamento.

De início, busca-se encontrar a quantificação da massa disponível, ou seja, a disponibilidade da casca de arroz para geração das potências elétrica e térmica. Essa informação e as expectativas de evolução devem ser disponibilizadas pela indústria de beneficiamento de arroz. Os dados coletados devem estar quantificados e apresentados de acordo com a produção ao longo do ano.

De posse dessa informação, aplica-se a Equação 3.1 para o cálculo da capacidade energética anual do biocombustível. (MAYER, 2014)

$$CE = \frac{MC \cdot PCI}{860.000} \quad (3.1)$$

onde CE representa a capacidade energética anual disponível da biomassa residual (MWh), MC corresponde ao montante de casca de arroz produzido anualmente (kg), PCI é o Poder Calorífico Inferior desta biomassa ($\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$) e 860.000 é o valor da conversão da unidade kcal para MWh.

A partir do estabelecimento da capacidade energética, constitu-se a consequente capacidade da geração das potências elétrica e térmica, por meio das Equações 3.2 e 3.3., respectivamente, a fim de que se verifique a possibilidade de atendimento da demanda e do consumo energético da planta industrial em questão.

$$P_e = \frac{CE \cdot \eta_1}{8.760} \quad (3.2)$$

$$P_t = \frac{CE \cdot \eta_2}{8.760} \quad (3.3)$$

onde P_e e P_t representam o potencial elétrico e térmico de geração (MW), respectivamente, η_1 corresponde ao eficiência elétrica da conversão energética, considerando as perdas do processo (que variam de acordo potência de geração, ciclo e tecnologia associada), η_2 corresponde ao eficiência térmica da conversão energética, considerando a possibilidade de cogeração de energia.

O somatório das eficiências η_1 e η_2 representa a eficiência global do processo de cogeração.

Na sequência, estima-se o Fator de Utilização (FU) do engenho por meio da Equação 3.4. Tal índice pode ser utilizado para verificar a potencialidade de geração apenas para abastecimento da indústria.

$$FU = \frac{RO}{8.760} \quad (3.4)$$

onde RO representa o regime operacional da indústria (h) e 8760 corresponde o total de horas em um ano.

Mediante os resultados finais da Equação 3.4 que contemplam a capacidade de produção de potência, compara-se com a necessidade de atendimento da demanda e consumo energético da planta. A partir dessa avaliação definem-se as características de geração da planta, considerando: o regime de trabalho (tempo integral de geração ou em consonância com o tempo de operação, ou ainda apenas em determinados horários); e a utilização da casca de arroz (aproveitar-se-á toda a casca residual para o máximo potencial de geração ou quantidade suficiente para abastecer a eletricidade e calor da indústria).

3.3.2 Identificação dos atores

Os atores são entendidos como indivíduos, entidades ou grupos de pessoas que têm interesses na tomada de decisão final uma vez que estão envolvidos direta ou indiretamente no processo decisório e nas consequências da decisão. Conforme exposto na seção 3.2.1, há diversos atores envolvidos no processo de decisão. Em particular, fazem parte do grupo de atores desta dissertação: os Agentes de Decisão (AD), o facilitador, o analista e as demais partes envolvidas ou *stakeholders*.

O decisor, denominado AD, deve assumir a responsabilidade do problema e influenciar no processo conforme o juízo de valores que o mesmo representa, mesmo que não tenha participação na estruturação do processo decisório. O facilitador é representado pela figura de um líder experiente que desenvolva o trabalho para resolução do problema, coordenando os pontos de vistas e os interesses dos decisores. O analista é responsável pela análise dos resultados finais do processo decisório, auxiliando os AD e o facilitador na estruturação do modelo, na identificação dos critérios de avaliação e nos métodos para seleção. Por fim, os *stakeholders* são formados por pessoas que representam um grupo ou instituição e que passam a ter influência e participação no processo decisório.

Os atores foram identificados e descritos por meio da Tabela 3.1. Aplicou-se também um questionário específico a eles, detalhado no Apêndice C, buscando assimilar as suas respectivas preferências.

Tabela 3.1 – Identificação dos atores do processo decisório

Ator	Representante	Identificação	Descrição
Indústria de beneficiamento	Diretor industrial	AD	Responsável pelo empreendimento e pela tomada de decisão.
Empresa de engenharia	Engenheiro	Facilitador	Auxilia e coordena o processo decisório.
Instituição de pesquisa	Pesquisador	Analista	Designado para a criação do modelo utilizado no processo decisório.
Concessionária de energia	Engenheiro	<i>Stakeholder</i>	Mesmo não sendo um AD, exerce influência sobre o decisor, uma vez que são afetados pelas consequências da tomada de decisão, seja de forma direta ou indireta.
Secretaria de Meio Ambiente	Secretário	<i>Stakeholder</i>	
Órgão público	Secretário	<i>Stakeholder</i>	
CREA	Engenheiro	<i>Stakeholder</i>	
Empresa terceira	Diretor	<i>Stakeholder</i>	

Fonte: próprio autor

3.3.3 Critérios

Conforme descrito na seção 2.2.1, em problemas envolvendo decisão multicriterial não existe uma única solução ótima para o problema, mas sim é eleita a alternativa que atende de forma mais satisfatória os diferentes critérios balanceados pelo AD (ALMEIDA, 2011). Neste sentido, cada decisor pode ter uma percepção diferente do problema em questão, sem que se possa dizer que está certo ou errado, mas que acaba influenciando na definição das alternativas, critérios e resultados finais. Portanto, tais circunstâncias abrem precedente para gerar possíveis controvérsias.

Em face dessa afirmativa, busca-se estabelecer um conjunto de atributos, fatores e indicadores que almejam à sustentabilidade do empreendimento. A análise científica e a escolha dos critérios provêm tanto uma revisão e um embasamento bibliográfico, quanto as preferências dos atores envolvidos no processo de decisão. Os parâmetros de avaliação podem ser classificados em quatro grupos principais: técnicos, econômicos, socioambientais. Os mesmos foram divididos em subcritérios que ora possuem propriedades numéricas (quantificados) ora possuem avaliações qualificadas (mediante auxílio e julgamento do facilitador).

A Tabela 3.2 apresenta todos os critérios, subcritérios e atributos avaliados nesta dissertação.

Tabela 3.2 – Identificação dos critérios do processo decisório

Critério	Subcritério	Identificação	Atributo
Técnico	Eficiência elétrica	EE	Quantitativo
	Eficiência térmica	ET	Quantitativo
	Fator de utilização de energia	FUE	Quantitativo
	Capacidade de geração	CG	Qualitativo
	Acesso à tecnologia	AT	Qualitativo
	Vida útil	VU	Quantitativo
Econômico	Custo da instalação	CI	Quantitativo
	Custo de operação e manutenção	O&M	Quantitativo
	Comercialização de subproduto	CS	Qualitativo
	Comercialização de crédito de carbono	CC	Qualitativo
Socioambiental	Impactos socioambientais	SA	Qualitativo

Fonte: próprio autor

Critérios técnicos

– Eficiência Elétrica (EE): refere-se à quantidade útil de energia elétrica fornecida, a partir da fonte primária do biocombustível, ou seja, a eficiência no processo de conversão energética da casca de arroz para geração de potência elétrica. O coeficiente de EE é definido pela razão entre a potência de entrada (contida no combustível) e a potência de saída (fornecimento de eletricidade). A tecnologia associada a cada forma de geração está intimamente relacionada ao índice de EE. Portanto, quanto maior o índice de eficiência elétrica, maior é o potencial quantitativo de geração de potência elétrica. O recíproco também é verdadeiro: para a geração de uma dada potência, quanto maior é a eficiência elétrica, menor é a utilização da biomassa.

– Eficiência Térmica (ET): de forma análoga a EE, refere-se à eficiência na conversão energética da biomassa para geração de potência térmica. A ET está vinculada à utilização do sistema para cogeração de energia, ou seja, aproveitamento do calor residual do processo termodinâmico para atendimento da demanda térmica da indústria. Seu coeficiente também é definido pela razão entre a potência de entrada (contida no combustível) e a potência de saída (fornecimento de calor).

– Fator de Utilização da Energia (FUE): esse subcritério mede a eficiência exergética ou eficiência global do processo, tendo em vista as limitações biofísicas e critérios de irreversibilidade existentes em processos termodinâmicos de conversão energética. Essa escala também deve considerar a existência de fatores adversos, como a eficiência técnica dos

equipamentos do processo (caldeira, geradores, turbinas, etc.), a escala de geração (que por sua vez também influencia o rendimento geral), a existência ou não de cogeração e a qualidade do combustível. O FUE é definido pela razão entre a energia do combustível e as potências elétrica e térmica produzidas. Logo, o maior aproveitamento da casca de arroz para geração culmina no maior valor deste coeficiente. Além disso, quanto maior o índice FUE, maior serão os benefícios ambientais do empreendimento. O uso racional da biomassa culmina normalmente na menor emissão de gases poluentes. Por outro lado, usualmente quanto mais a tecnologia for agregada à forma de geração para maximizar a eficiência, maior é o custo da instalação.

– Capacidade de Geração (CG): é um subcritério criado para verificar a confiabilidade e adaptabilidade da tecnologia no atendimento constante das demandas elétrica, ou elétrica e térmica do processo industrial (serão apresentadas alternativas tecnológicas exclusivamente voltadas à geração de eletricidade, como também geração conjunta de eletricidade e calor). Desta forma, avalia-se a fiabilidade do sistema, considerando os riscos técnicos referentes à capacidade de resistência à falha e mudança tecnológica.

– Acesso à Tecnologia (AT): avalia qualitativamente a caracterização tecnológica do sistema, ponderando: a taxa de maturidade tecnológica e a sua penetração nos mercados internacionais; a existência de equipamentos e alternativas factíveis e análogas (também chamado de *spin off* técnico).

– Vida útil (VU): nesta subcritério são estimados os valores de vida útil da planta.

Critérios econômicos

– Custo de Instalação (CI): é composto por todas as despesas relativas ao custo da instalação do empreendimento: compra de equipamentos mecânicos, instalações tecnológicas, interligação à rede elétrica (caso necessário), serviços de engenharia, outros trabalhos de construção.

– Custo de Operação e Manutenção (O&M): pode ser dividido em duas variáveis: custo de operação (que inclui salários dos funcionários e do próprio funcionamento da usina) e custo de manutenção (que incluir tanto em ações corretivas do sistema quanto para prolongar a vida útil e evitar falhas que possam levar à suspensão de operação). Para o estudo de caso, é realizada a estimativa de O&M necessária, conforme o tipo de tecnologia associado.

– Comercialização de subproduto (CS): conforme a tecnologia e a conversão energética associadas há a possibilidade de comercialização de subprodutos, como a casca carbonizada. Conforme descrito na seção 2.1.6, devido ao elevado teor de sílica, esse subproduto pode ser aplicado em vários ramos da indústria, como, por exemplo: na eletrônica, construção civil, cerâmica, indústria química e fabricação de células fotovoltaicas.

– Comercialização de Créditos de Carbono (CC): variável atrelada à redução da emissão de gases poluentes, logo, quanto maior esse índice, maior o benefício econômico.

Critérios socioambientais

– Impactos socioambientais (SA): avalia os impactos socioambientais relacionadas ao âmbito ecológico, meio ambiente e social sob a ótica do aproveitamento bioenergético da biomassa. Considera a redução de emissão de gases poluentes, as alterações climáticas, como também a geração de emprego relacionadas às alternativas de arranjo tecnológico.

3.3.4 Alternativas tecnológicas

As alternativas tecnológicas para GD em indústrias de beneficiamento de arroz e avaliadas no estudo de caso são:

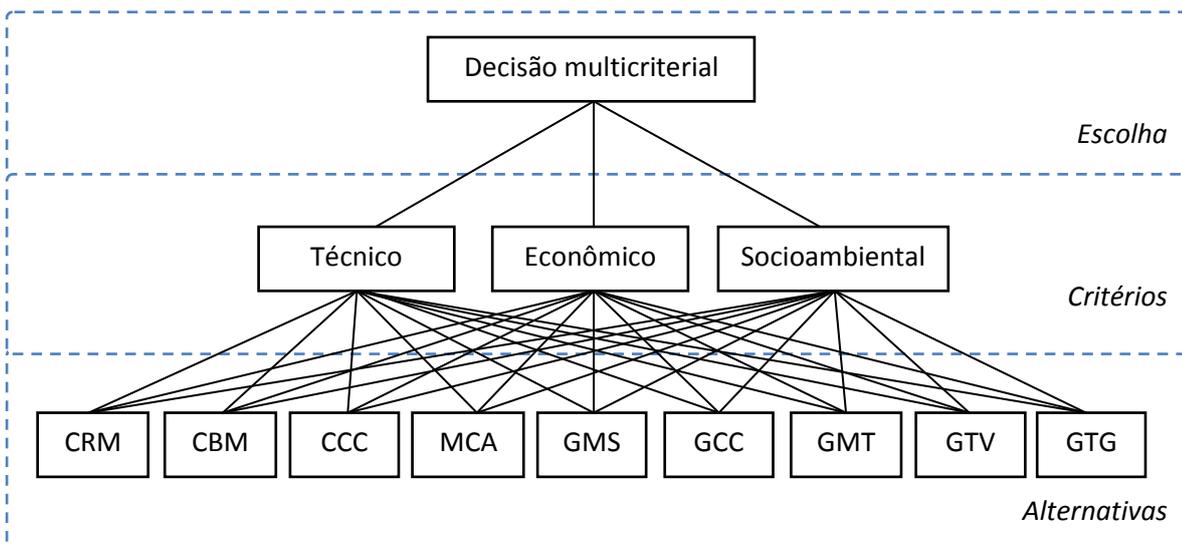
- Cogeração com ciclo Rankine montante (CRM)
- Cogeração com ciclo Brayton montante (CBM)
- Cogeração com ciclo combinado (CCC)
- Geração com MCA (MCA)
- Geração com Motor Stirling (GMS)
- Geração com células a combustível (GCC)
- Geração com microturbinas (GMT)
- Geração com turbinas a vapor (GTV)
- Geração com turbina a gás (GTG)

A validação de utilização das alternativas para geração de energia e cogeração por meio da casca de arroz foi previamente descrita na seção 2.1.6 - estado da arte para geração de energia elétrica proveniente da casca de arroz.

3.3.5 Estruturação do problema

A fim de se avaliar cada opção de geração de potência e estruturar o problema, uma árvore de hierarquia foi construída para a aplicação do método multicriterial de apoio à decisão, conforme ilustra a Figura 3.4.

Figura 3.4 – A estruturação do problema por meio de hierarquia



Fonte: próprio autor

No nível superior da árvore de hierarquia está o objetivo, que é a escolha da melhor alternativa dentre as opções para geração energia. No nível seguinte são apresentados os critérios utilizados para a avaliação: técnicos, econômicos e socioambientais. Os mesmos foram divididos nos onze subcritérios, apresentados na seção 3.3.3. As nove possíveis alternativas tecnológicas aparecem no nível mais baixo.

3.4 DECISÃO MULTICRITERIAL

De posse de todos os fatores elementares pertinentes à construção e estruturação do modelo (diversificação de atores, variedade e rigidez das alternativas, critérios de operacionalização do tema sustentabilidade, fundamentação de informações qualitativas e quantitativas), aplica-se o método multicriterial para apoio à decisão, de modo a encontrar a solução que atenda o consenso e objetivo global.

Na seleção das alternativas tecnológicas para GD definiu-se um método discreto de aplicação em vista do número finito de opções. A escolha do método é dada em função da

natureza do problema, dos critérios analisados e da condução da modelagem de preferência. Buscou-se aplicar um método que: atendesse a problemática de hierarquia; permitisse trabalhar com informações imprecisas, ora subjetivas em função da avaliação qualitativa de algumas questões; tivesse aplicabilidade na área de seleção de tecnologia para geração de energia; facilidade de assimilação e compreensão dos AD. Diante destas premissas, aplicou-se o método *Analytic Hierarchy Process* (AHP).

3.4.1 Método *Analytic Hierarchy Process* (AHP)

O AHP é um método compensatório para resolução de problemáticas de ordenação, conforme descrito na seção 2.2. Sua teoria reflete a tomada de decisão do raciocínio humano, no qual os elementos são distribuídos em grupos, conforme a atribuição das propriedades comuns. Desta forma, o raciocínio é estruturado de forma hierárquica, para posteriormente ser tomada uma decisão. O fundamento da análise hierárquica consiste na decomposição e síntese das relações entre os critérios aproximando-se a uma melhor resposta em função da priorização de seus indicadores.

Primeiramente, o processo de estruturação do problema leva à formulação da hierarquia, ao estabelecimento de critérios e às alternativas. Na sequência, é realizada a definição dos graus de importância baseados na comparação por pares, o que permite avaliar a consistência da decisão em cada nível de hierarquia. Por fim, o modelo matemático é aplicado resultando na ordenação da qualificação de cada alternativa.

Cada alternativa e critério são avaliados com um grau de importância em relação a outro, estabelecido de acordo com uma escala numérica de valores para comparação, também denominada de peso, conforme ilustra a Tabela 3.3.

O julgamento, que pode ser verbal ou numérico, deve ser realizado por meio da avaliação dos AD, ponderando a avaliação dos *stakeholders*. Tal avaliação considera o quanto é mais ou menos importante cada critério em relação a outro, sempre com julgamentos aos pares.

Posteriormente, são construídas as Matrizes de Comparação Paritária (MCP), conforme apresenta a expressão 3.5.

Tabela 3.3 – Escala numérica para comparação e julgamentos

Escala numérica	Grau de importância
1	Mesma importância
3	Moderada
5	Forte
7	Muito forte
9	Extremamente importante
2, 4, 6, 8	Valores intermediários

Fonte: (SAATY, 1990)

$$M = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_n \\ \begin{matrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (3.5)$$

onde M representa a matriz de comparação paritária dos critérios, C_1, C_2, C_n indicam o número de critérios de avaliação, a_{ij} é o grau de importância do critério i sobre o critério j .

Torna-se válido ressaltar aqui que o elemento mais importante da comparação é sempre usado como um valor inteiro da escala e o menos importante, como sendo o inverso dessa unidade. Portanto, assume-se que a diagonal principal da matriz da equação 3.5 representa a própria avaliação do critério C_i , possuindo o valor igual a um, $a_{ii} = 1$, e nos demais julgamentos a relação de reciprocidade é $a_{ji} = 1 / a_{ij}$.

Em seguida, é calculada a prioridade ou peso de cada critério, obtido através da aplicação de um processo em duas etapas. Na primeira etapa, somam-se todos os valores de cada coluna e, a fim de normalização, divide-se cada valor de cada coluna pelo valor da soma da respectiva coluna. Constitui-se, portanto, uma nova matriz normalizada, conforme apresenta a expressão 3.6.

$$a_{ij}^* = \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{ik}} \quad (3.6)$$

Na etapa posterior, calcula-se o valor médio de cada linha da matriz normalizada, em conformidade com a expressão 3.7, obtendo, finalmente, a Prioridade Relativa (PR) do critério em análise. Este procedimento deve ser repetido para todos os critérios.

$$w_k = \sum_{i=1}^n \frac{a_{ij}^*}{n} \quad (3.7)$$

onde w_k é o peso do critério k e n o número de critérios.

Uma vez que a metodologia AHP utilize como base de solução a opinião de especialistas, é possível encontrar eventualmente certo grau de inconsistência nos julgamentos realizados, o que pode ocorrer devido à complexidade do problema ou pouca afinidade do especialista com o tema. Desse modo, um dos diferenciais do AHP em relação a outros métodos de tomada de decisão multicriterial é o cálculo de um indicador de consistência do julgamento do especialista, calculado a partir da expressão 3.8.

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (3.8)$$

onde RC representa a Razão de Consistência e expressa a aceitação do julgamento do AD.

A razão RC é obtida pela razão entre o Índice de Consistência (IC) e o Índice Aleatório de Consistência (IR).

Por sua vez, o índice IC expressa o quanto a matriz se distancia de uma matriz de consistência. Para uma matriz de tamanho u , o índice IC é determinado pela expressão 3.9, onde λ_{\max} corresponde ao máximo autovalor da matriz de julgamento.

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - u}{u - 1} \quad (3.9)$$

Para o cálculo de IC é necessário determinar o valor dos autovalores da matriz de julgamento, etapa que inclui a multiplicação da matriz pelo peso dos critérios, gerando um vetor novo. A partir desse novo vetor, divide-se cada elemento do vetor pelo seu respectivo vetor de peso, onde o resultado dessa divisão é utilizado para calcular o máximo autovalor da matriz, o qual corresponderá à média dos números do vetor.

Já o valor do índice *IR* pode ser determinado diretamente através da aplicação da Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Índice de consistência em relação ao número de critérios comparados

Número	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
IR	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49	1,52	1,54	1,56	1,58	1,59

Fonte: (SAATY e OZDEMIR, 2003)

O valor de *RC* admissível para que se considerem as informações do especialista consistentes é de até 0,1 com um número máximo de sete critérios analisados. Caso eventualmente o valor de *RC* encontrado estiver acima desse valor, as avaliações não são consideradas suficientemente sensíveis e precisas.

Etapas para aplicação do método AHP no estudo de caso

De caráter instrutivo, são descritas as principais etapas de aplicação do método AHP, caracterizadas, basicamente, por três processos.

No primeiro processo, constrói-se a *M* das alternativas (expressão 3.5) e calculam-se as *PR* entre as alternativas (expressões 3.6 e 3.7), considerando separadamente cada um dos critérios. Desta forma, o AD avalia as alternativas em pares, considerando um único critério por vez. Tal avaliação é realizada considerando a escala numérica apresentada na Tabela 4.3. Após, verifica-se a coerência no julgamento através do cálculo de *RC*, descrito na expressão 3.8.

No processo intermediário procede-se da mesma forma matemática usada no processo inicial, porém, desta vez, almeja-se calcular o *PR* entre todos os critérios para cada uma das perspectivas em questão.

Por fim, no último processo, multiplicam-se os valores das ponderações das alternativas pelas ponderações obtidas em cada critério, considerando separadamente cada perspectiva. Estas multiplicações originam uma nova matriz, onde as células de cada linha devem ser somadas, resultando na *PR* final de cada alternativa. O melhor valor encontrado será a melhor opção tecnológica, ou seja, a opção preferencial do AD.

3.5 RESUMO DO CAPÍTULO

O capítulo apresenta detalhadamente a metodologia proposta para esta dissertação a fim de verificar a melhor alternativa tecnológica para geração distribuída, considerando o potencial bioenergético de casca de arroz. Para isso, é exposto inicialmente o planejamento de pesquisa, com o propósito de definir e delimitar o tema, bem como estabelecer a modalidade científica. Na sequência, é abordada a modelagem do problema, com a intenção de criar um modelo e a estruturação para resolução do processo decisório. Por fim, detalha-se cada um dos fatores levantados pelo modelo: potencial de geração e cogeração, identificação dos atores, definição dos critérios e alternativas, e o método AHP para apoio à tomada de decisão considerando multicritérios.

4. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA – ESTUDO DE CASO

Este capítulo apresenta o estudo de caso em uma indústria de beneficiamento de arroz, localizada na cidade de Itaqui – RS, com a finalidade de aplicação e comprovação da metodologia proposta. São criados dois cenários com objetivos técnicos distintos aos quais se atrelam pesos aos critérios e alternativas mediante avaliação qualitativa e quantitativa das informações – ponderando os interesses do AD. Por fim, para cada cenário é aplicado o método multicriterial e encontradas as soluções de forma hierárquica, de modo a auxiliar à tomada de decisão para seleção do tipo de minigeração distribuída.

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Conforme descrito na seção 3.3, inicialmente realiza-se o levantamento das informações e características reais de operação da indústria de beneficiamento, por meio do formulário apresentado no Apêndice B. Estas informações são fundamentais para quantificar o potencial disponível de biomassa através da aplicação da modelagem matemática, detalhada na seção 3.4.1. No passo seguinte, são apresentadas as alternativas técnicas para geração, como também o seu respectivo banco de dados, alusivos aos critérios qualitativos e quantitativos.

Para critério de simulação do estudo de caso foram analisados dois cenários. A distribuição de pesos para criação do primeiro cenário foi baseada nas preferências do AD, figuradas pelo diretor de operação da indústria. Estas informações foram obtidas por meio de um questionário, apresentado no Apêndice C. Ainda assim, definiu-se também a criação do segundo cenário, levando-se em conta preferencialmente aspectos de cunho socioambiental.

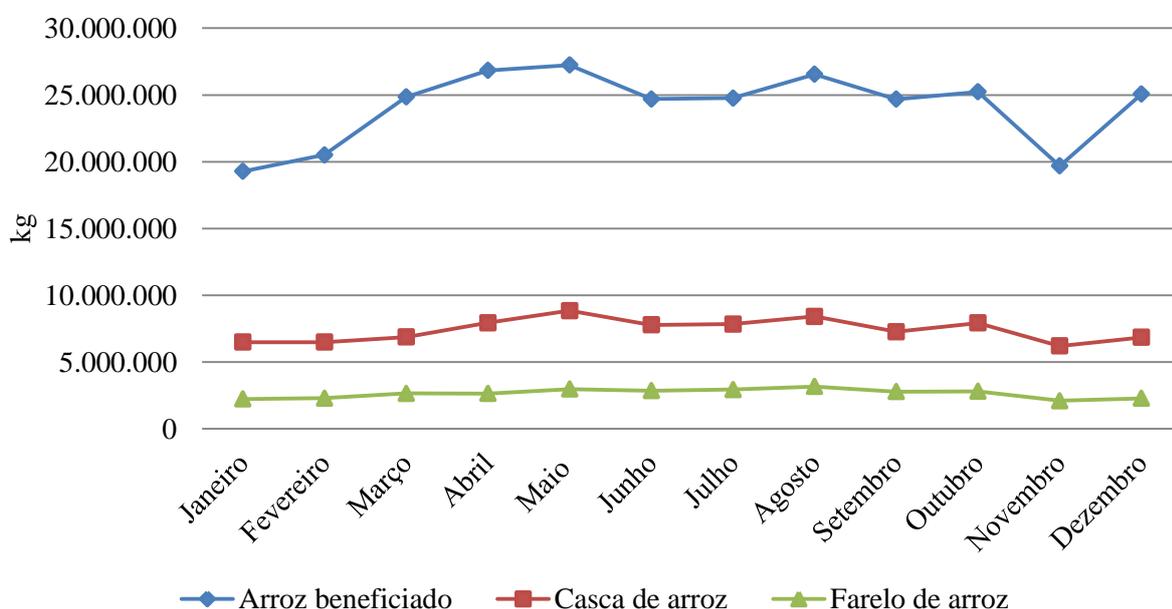
Finalmente para cada cenário aplicou-se o método AHP a fim de obter em forma ordenada (por meio de uma pontuação numérica) as alternativas tecnológicas para geração.

4.2 QUANTIFICAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO

Para quantificação do potencial energético, foram consideradas as informações coletadas por meio do formulário específico de tal forma a se poder quantificar o potencial de biomassa residual e, posteriormente, avaliar a possibilidade de transformá-la em potências elétrica e térmica.

Na Figura 4.1 é possível observar a variação de processamento do cereal ao longo do ano de 2015, na indústria de beneficiamento deste estudo de caso.

Figura 4.1 – Distribuição do produto final e dos subprodutos na indústria em 2015



Fonte: próprio autor

Na classificação de arroz da Figura 4.1, foi considerado o montante de produto beneficiado para fins comerciais – fazendo parte desta composição de produto final o arroz “polido”, “quebrado” e “canjição”. Além disso, foram apresentadas também informações específicas referentes à quantidade de casca de arroz e farelo produzidos mensalmente. É válido ressaltar também que estes dois últimos subprodutos são considerados a sobra do processo de beneficiamento.

Já a Tabela 4.1 detalha a quantidade de cereal na entrada do processo (ou seja, apresenta o montante de produto bruto advindo da colheita logo após passar pelo processo de pré-limpeza), a casca de arroz produzida mensalmente em 2015 e o percentual desse subproduto em relação ao valor bruto.

Tabela 4.1 – Distribuição da geração da biomassa residual em 2015

Mês	Arroz bruto (kg)	Casca de arroz (kg)	Porcentagem (%)
Janeiro	28.010.378	6.493.555	23,2%
Fevereiro	29.294.019	6.486.165	22,1%
Março	34.388.035	6.878.632	20,0%
Abril	37.417.413	7.937.887	21,2%
Mai	39.065.836	8.850.147	22,7%
Junho	35.334.578	7.781.459	22,0%
Julho	35.556.012	7.848.451	22,1%
Agosto	38.135.085	8.410.709	22,1%
Setembro	34.733.024	7.264.147	20,9%
Outubro	35.973.645	7.929.215	22,0%
Novembro	27.990.935	6.201.045	22,2%
Dezembro	30.207.840	6.852.344	22,7%
Total	406.106.800	88.933.756	21,9%

Fonte: próprio autor

É possível constatar, através da Tabela 4.1, que no ano de 2015 a indústria deste estudo de caso beneficiou em média 33.842.233 kg/mês de arroz e proporcionou uma sobra média de 7.411.146 kg/mês de casca de arroz. Ou seja, em média 21,9% da massa total de grãos refere-se à casca, considerada sobra do processo. Tal índice é condizente com as informações encontradas na literatura, visto na seção 2.1.2.1. A variação de porcentagem constatada em alguns meses vincula-se diretamente a umidade presente no grão que, por sua vez, está ligada ao processo conservação (aeração) na etapa da armazenagem. De qualquer maneira, atribui-se como sendo 13% o limite máximo tolerável de umidade relativa do arroz natural admitido no processo de beneficiamento, em conformidade com a legislação nacional (MAPA,1988). Além do mais, é válido ressaltar que a perspectiva de crescimento da produção relacionada ao beneficiamento do arroz na indústria está projetada para em torno de 5% ao longo dos próximos dez anos.

Conforme detalhado na seção 3.3.1, de posse da informação da geração e disponibilidade de resíduos, obtém-se a capacidade energética anual do biocombustível, por meio da Equação 4.1.

$$CE = \frac{MC \cdot PCI}{860.000} = 330.916,3 \text{ MWh} \quad (4.1)$$

onde CE representa a capacidade energética anual disponível da biomassa residual (MWh), MC corresponde ao montante de casca de arroz produzido anualmente, avaliando em 88.9339.756 kg no ano de 2015, PCI é o Poder Calorífico Inferior desta biomassa, sendo considerado o valor de $3.200 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1}$ (HOFFMAN, 1999) e 860.000 é o valor da conversão da unidade kcal para MWh.

No entanto, para cálculo do potencial mínimo da geração, é considerada a menor produção mensal de resíduo dada a disparidade na produção ao longo do ano e tendo como referência a produção diária constante neste mês. Além do mais, tendo em vista as observações apontadas em Mayer (2009), é subtraído 25% da produção de biomassa. Tal índice representa a média de reaproveitamento dos resíduos a serem aplicados em fornalhas para abastecer energeticamente o processo de secagem de grãos. Portanto, tendo como premissa a sobra residual mensal de 4.650.783 kg calcula-se a capacidade energética mensal da biomassa por meio da Equação 4.2.

$$CE = \frac{MC \cdot PCI}{860.000} = 17.305,2 \text{ MWh} \quad (4.2)$$

A partir da obtenção da capacidade bioenergética residual mínima mensal, encontra-se a capacidade instantânea de geração das potências elétrica e térmica por meio das Equações 4.3 e 4.4., respectivamente.

$$P_e = \frac{CE \cdot \eta_1}{730} = 5,92 \text{ MW} \quad (4.3)$$

$$P_t = \frac{CE \cdot \eta_2}{730} = 4,74 \text{ MW} \quad (4.4)$$

onde P_e e P_t representam o potencial elétrico e térmico de geração em MW, respectivamente, η_1 corresponde ao índice percentual de eficiência elétrica da conversão energética da biomassa residual, η_2 corresponde ao índice percentual de eficiência térmica da conversão energética (considerando a possibilidade de cogeração de energia) e 730 é o valor de horas no mês. Os valores atribuídos a η_1 e η_2 foram de 25% e 20%, respectivamente, e representam os menores índices encontrados na literatura (a serem detalhados na seção 4.3).

Na sequência, estima-se o Fator de Utilização (FU) do engenho para verificação do atendimento da demanda e consumo energético. A planta industrial opera em tempo integral,

com a única exceção dos feriados, que não possuem turno de trabalho. Para fins de simplificação, atribui-se para o presente estudo de caso um valor unitário para a FU.

A Tabela 4.2 apresenta o consumo de energia elétrica mensal na indústria, o respectivo fator de carga, como também a demanda contratada no ano de 2015.

Tabela 4.2 – Distribuição do consumo de energia, demanda e fator de carga em 2015

Mês	Consumo (MWh)	Demanda (MW)	Fator de carga
Janeiro	785,787	3,725	0,2890
Fevereiro	1.080,087	3,725	0,3972
Março	1.131,193	3,725	0,4160
Abril	1.113,311	3,725	0,4094
Maio	957,983	3,725	0,3523
Junho	1.251,360	3,725	0,4602
Julho	1.359,936	3,725	0,5001
Agosto	588,096	3,725	0,2163
Setembro	726.432	3,725	0,2671
Outubro	1.223,328	3,725	0,4499
Novembro	1.568,352	3,725	0,5768
Dezembro	941,472	3,725	0,3462
Total	12.727,34	-	-

Fonte: próprio autor

O consumo médio mensal apresentado no exemplo da Tabela 4.2 foi de 1.060,61 MWh e o fator de carga médio foi de 0,39.

Por fim, a Tabela 4.3 ilustra o resumo de informações levantadas e o potencial bioenergético obtido para geração de potência elétrica e térmica.

Tabela 4.3 – Resumo de informações levantadas e potencial bioenergético

(continua)

Variável	Detalhe	Valor
Casca de arroz	Produção anual de biomassa	88.933.756 kg
	Produção média mensal	33.842.233 kg
	Valor mínimo mensal obtido	6.201.045 kg
	Porcentagem utilizada para outros fins	25%
	Valor mensal considerado para análise do trabalho	4.650.783 kg
Energia	Capacidade instantânea de geração de potência elétrica	5,92 MW
	Capacidade mensal de geração de potência elétrica	4.721,6 MWh
	Capacidade de geração de potência térmica	4,74 MW
	Poder calorífico inferior considerado	3.200 kcal · kg-1

Tabela 4.3 – Resumo de informações levantadas e potencial bioenergético

(conclusão)		
Variável	Detalhe	Valor
Energia	Rendimento elétrico considerado	25%
	Rendimento térmico considerado	20%
Consumo	Consumo anual da indústria	12.727,34 MWh
	Consumo médio mensal	1.060,61 MWh
	Consumo máximo obtido	1.568,352 MWh
	Demanda	3,725 MW

Fonte: próprio autor

Diante dos resultados apresentados na Tabela 4.3, conclui-se que a biomassa residual gerada tem a capacidade de geração de potência elétrica para abastecer e suprir a demanda energética da indústria de beneficiamento de grãos. Ademais, ainda é possível avaliar o potencial de comercialização de excedentes. É válido ressaltar também que a potência térmica que pode ser gerada através da cogeração de energia pode suprir a demanda de processos industriais, como, por exemplo, para obtenção de óleo de arroz – atividade praticada pela indústria.

Para o estudo de caso, será atribuída a possibilidade de minigeração distribuída de 5MW. No próximo item será apresentada a caracterização das possíveis alternativas de geração, descrevendo os critérios quantitativos e qualitativos – tais informações integram a base de dados da pesquisa.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS ALTERNATIVAS

Foram consideradas as seguintes alternativas para geração das potências elétrica e térmica, utilizando a casca de arroz, conforme detalhamento na seção 2.1.4:

- Geração com turbinas a vapor (GTV)
- Geração com turbina a gás (GTG)
- Geração com microturbinas (GMT)
- Geração com motor de combustão alternativa (MCA)
- Geração com Motor Stirling (GMS)
- Geração com células a combustível (GCC)
- Cogeração com ciclo Rankine montante (CRM)
- Cogeração com ciclo Brayton montante (CBM)
- Cogeração com ciclo combinado (CCC)

Para cada alternativa foram analisados os seguintes critérios, conforme a seção 3.3.3:

- Eficiência elétrica (EE)
- Eficiência térmica (ET)
- Fator de utilização de energia (FUE)
- Capacidade de geração (CG)
- Acesso à tecnologia (AT)
- Vida útil (VU)
- Custo da instalação (CI)
- Custo de operação e manutenção (O&M)
- Comercialização de subproduto (CS)
- Comercialização de crédito de carbono (CC)
- Impacto socioambiental (SA)

Para a base de dados a ser aplicada na metodologia proposta nesta dissertação foram considerados os atributos qualitativos e quantitativos dos critérios frente às alternativas para geração. As informações quantitativas referenciam-se nas seguintes literaturas: Barin (2012), Barja (2006), Brignol (2013), Figueiredo (2011), Fortes (2007), Henriques (2009), Lora & Haddad (2006), Mayer (2009; 2014), Neto (2001), Pelegrini (2009), Prieto (2003), Sales (2008), Velazques (2004; 2006). Já as avaliações qualitativas foram estabelecidas por meio da participação do facilitador e de um especialista. A Tabela 4.4 e a Tabela 4.5 apresentam os valores quantitativos e qualitativos, respectivamente, para o estudo de caso.

As pontuações finais referentes aos critérios qualitativos (AT, CG, CS, SA) foram definidas a partir do consenso alcançado pelos especialistas, facilitadores, *stakeholders* e AD.

Tabela 4.4 – Base de dados de critérios quantitativos

Critérios	EE	ET	FUE	VU	CI	O&M
Alternativas	(%)	(%)	(%)	(anos)	(US\$/kW)	(US\$/kWh)
GTV	25	-	25	20	1000	0,004
GTG	30	-	30	15	2000	0,010
GMT	28	-	28	20	2200	0,009
MCA	35	-	35	20	1200	0,012
GMS	30	-	30	10	2500	0,014
GCC	50	-	50	8	6000	0,001
CRM	25	25	50	20	3000	0,013
CBM	30	25	55	15	3500	0,017
CCC	55	20	75	15	6000	0,027

Tabela 4.5 – Base de dados de critérios qualitativos

Critérios	CG	AT	CS	CC	SA
Alternativas					
GTV	0,4	1	1	0,4	0,6
GTG	0,4	1	0	0,5	0,6
GMT	0,9	0,7	0	0,45	0,65
MCA	0,9	0,9	0	0,6	0,7
GMS	0,7	0,7	0	0,5	0,6
GCC	0,6	0,4	0	0,7	0,8
CRM	0,4	0,6	1	0,7	0,8
CBM	0,4	0,6	0	0,8	0,85
CCC	0,4	0,5	0	0,9	0,9

Fonte: próprio autor

Referente ao critério relacionado ao acesso à tecnologia, as maiores pontuações foram atribuídas às turbinas a vapor, a gás, e, na sequência, aos motores de combustão alternativos. Essas escolhas se devem ao fato da tecnologia ser altamente difundida, tanto no mercado nacional quanto no internacional. Na sequência, as notas intermediárias foram definidas às microturbinas e aos motores Stirling, devidos ao *spin off* técnico, fator considerado na ponderação da nota. A nota mais baixa desse critério foi atribuída às células a combustível devido, principalmente, à questão da maturidade tecnológica e as constantes mudanças tecnológicas.

Referente ao critério de capacidade de geração, as notas foram conferidas de acordo com a confiabilidade do sistema, ou seja, a capacidade de resistência às falhas e a continuidade do fornecimento da potência elétrica. Nessa lógica, os sistemas que tiveram as maiores pontuações foram as microturbinas e os motores de combustão alternativos, seguidos dos motores Stirling e das células a combustível. O estabelecimento dessas notas superiores se deve, principalmente, à possibilidade da fragmentação da geração de potência por meio de módulos. As duas menores notas foram atribuídas aos sistemas com turbinas a gás e a vapor, justamente por possuírem apenas um módulo de geração.

Com relação ao critério ligado à comercialização de subproduto, o único sistema que utiliza o processo de combustão da casca de arroz para geração de potência elétrica é por meio das turbinas a vapor. Portanto, dada à possibilidade da comercialização da casca carbonizada, esse único sistema recebeu a pontuação máxima.

Já o critério econômico pertinente à comercialização do crédito de carbono está atrelado a variável quantitativa de redução da emissão de poluentes à atmosfera. Logo, quanto

maior esse índice maior o benefício econômico oriundo da negociação e comercialização do crédito. O sistema com maior nota agregada foi as células a combustível, seguido de cogeração com ciclo combinado.

Os impactos socioambientais estão ligados fundamentalmente à minimização da degradação ambiental e à emissão de gases do efeito estufa, como também à maior geração de empregos. Nesta etapa os sistemas que apresentaram as maiores notas foram as células a combustível e a cogeração com ciclo combinado, respectivamente.

4.4 DEFINIÇÃO DOS PESOS

A fim de estabelecer os cenários de simulação e obtenção dos resultados, foram definidos os critérios por relevância. O primeiro cenário foi construído tendo como premissa os interesses do AD ponderando as influências dos *stakeholders*. Tais informações foram obtidas por meio do questionário apresentado no Apêndice C. Desta forma, estabeleceu-se o Cenário 1:

Cenário 1 – 1º) custo de instalação; 2º) custo de operação e manutenção; 3º) vida útil; 4º) capacidade de geração; 5º) comercialização de subproduto; 6º) comercialização de créditos de carbono; 7º) acesso à tecnologia; 8º) eficiência elétrica; 9º) eficiência térmica; 10º) fator de utilização de energia; e 11º) impactos socioambientais.

Além desta análise, de modo a estabelecer uma comparação com o Cenário 1, criou-se um segundo cenário fictício, alusivo aos aspectos de relevância socioambiental:

Cenário 2 – 1º) impactos socioambientais; 2º) fator de utilização de energia; 3º) eficiência elétrica; 4º) eficiência térmica; 5º) vida útil; 6º) capacidade de geração; 7º) acesso à tecnologia; 8º) comercialização de subproduto; 9º) comercialização de créditos de carbono; 10º) custo de operação e manutenção; e 11º) custo de instalação.

4.5 APLICAÇÃO DO MÉTODO MULTICRITERIAL

Conforme detalhado no item 3.4.1, para aplicação do método multicritério inicialmente é construída a matriz de comparação paritária (MCP) de forma a determinar o peso entre alternativas, considerando individualmente cada um dos critérios. Posteriormente, é calcula-se a prioridade relativa (PR) entre as alternativas, assim como é verificada a coerência do julgamento. Conforme visto em Saaty (2003), o cálculo da razão de consistência (RC) do julgamento deve ser inferior a 0,1 de modo a satisfazer suficientemente à sensibilidade e

precisão esperadas pelo especialista. A Tabela 4.6 apresenta os resultados da MCP atribuídos pelo AD referentes às alternativas.

Tabela 4.6 – Determinação do peso entre as alternativas

(continua)

Critério 1 - eficiência elétrica (RC=0,07194)										
	GTV	GTG	GMT	MCA	GMS	GCC	CRM	CBM	CCC	PR
GTV	1,000	0,250	0,500	0,167	0,250	0,125	1,000	0,250	0,111	0,406
GTG	4,000	1,000	3,000	0,333	1,000	0,143	4,000	1,000	0,125	1,622
GMT	2,000	0,333	1,000	0,200	0,333	0,143	2,000	0,333	0,111	0,717
	GTV	GTG	GMT	MCA	GMS	GCC	CRM	CBM	CCC	PR
MCA	6,000	3,000	5,000	1,000	3,000	0,167	6,000	3,000	0,125	3,032
GMS	4,000	1,000	3,000	0,333	1,000	0,143	4,000	1,000	0,125	1,622
GCC	8,000	7,000	7,000	6,000	7,000	1,000	8,000	7,000	0,250	5,694
CRM	1,000	0,250	0,500	0,167	0,250	0,125	1,000	0,250	0,111	0,406
CBM	4,000	1,000	3,000	0,333	1,000	0,143	4,000	1,000	0,125	1,622
CCC	9,000	8,000	9,000	8,000	8,000	4,000	9,000	8,000	1,000	7,111
Critério 2 - eficiência térmica (RC=0)										
	GTV	GTG	GMT	MCA	GMS	GCC	CRM	CBM	CCC	PR
GTV	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,111	0,111	0,040
GTG	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,111	0,111	0,040
GMT	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,111	0,111	0,040
MCA	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,111	0,111	0,040
GMS	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,111	0,111	0,040
GCC	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,111	0,111	0,040
CRM	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,111	0,111	0,040
CBM	9,000	9,000	9,000	9,000	9,000	9,000	9,000	1,000	1,000	0,360
CCC	9,000	9,000	9,000	9,000	9,000	9,000	9,000	1,000	1,000	0,360
Critério 3 - fator de utilização de energia (RC=0,08518)										
	GTV	GTG	GMT	MCA	GMS	GCC	CRM	CBM	CCC	PR
GTV	1,000	0,333	0,500	0,200	0,333	0,143	0,143	0,125	0,111	0,017
GTG	3,000	1,000	2,000	0,333	1,000	0,167	0,167	0,143	0,111	0,032
GMT	2,000	0,500	1,000	0,250	0,500	0,143	0,143	0,125	0,111	0,022
MCA	5,000	3,000	4,000	1,000	3,000	0,200	0,200	0,167	0,125	0,060
GMS	3,000	1,000	2,000	0,333	1,000	0,167	0,167	0,143	0,111	0,032
GCC	7,000	6,000	7,000	5,000	6,000	1,000	1,000	0,333	0,167	0,130
CRM	7,000	6,000	7,000	5,000	6,000	1,000	1,000	0,333	0,167	0,130
CBM	8,000	7,000	8,000	6,000	7,000	3,000	3,000	1,000	0,200	0,195
CCC	9,000	9,000	9,000	8,000	9,000	6,000	6,000	5,000	1,000	0,381
Critério 4 - vida útil (RC=0,04507)										
	GTV	GTG	GMT	MCA	GMS	GCC	CRM	CBM	CCC	PR
GTV	1,000	5,000	1,000	1,000	7,000	9,000	1,000	5,000	5,000	0,199

Tabela 4.6 – Determinação do peso entre as alternativas

(continuação)

	GTV	GTG	GMT	MCA	GMS	GCC	CRM	CBM	CCC	PR
GTG	0,200	1,000	0,200	0,200	5,000	5,000	0,200	1,000	1,000	0,055
GMT	1,000	5,000	1,000	1,000	7,000	9,000	1,000	5,000	5,000	0,199
MCA	1,000	5,000	1,000	1,000	7,000	9,000	1,000	5,000	5,000	0,199
GMS	0,143	0,200	0,143	0,143	1,000	3,000	0,143	0,200	0,200	0,024
GCC	0,111	0,200	0,111	0,111	0,333	1,000	0,111	0,200	0,200	0,016
CRM	1,000	5,000	1,000	1,000	7,000	9,000	1,000	5,000	5,000	0,199
CBM	0,200	1,000	0,200	0,200	5,000	5,000	0,200	1,000	1,000	0,055
CCC	0,200	1,000	0,200	0,200	5,000	5,000	0,200	1,000	1,000	0,055
Critério 5 - custo de instalação (RC=0,08329)										
	GTV	GTG	GMT	MCA	GMS	GCC	CRM	CBM	CCC	PR
GTV	1,000	5,000	5,000	2,000	6,000	9,000	8,000	8,000	9,000	0,324
	GTV	GTG	GMT	MCA	GMS	GCC	CRM	CBM	CCC	PR
GTG	0,200	1,000	2,000	0,250	3,000	7,000	5,000	5,000	7,000	0,130
GMT	0,200	0,500	1,000	0,250	2,000	7,000	4,000	5,000	7,000	0,106
MCA	0,500	4,000	4,000	1,000	5,000	8,000	7,000	7,000	8,000	0,240
GMS	0,167	0,333	0,500	0,200	1,000	6,000	3,000	3,000	6,000	0,076
GCC	0,111	0,143	0,143	0,125	0,167	1,000	0,200	0,250	1,000	0,018
CRM	0,125	0,200	0,250	0,143	0,333	5,000	1,000	2,000	5,000	0,049
CBM	0,125	0,200	0,200	0,143	0,333	4,000	0,500	1,000	4,000	0,039
CCC	0,111	0,143	0,143	0,125	0,167	1,000	0,200	0,250	1,000	0,018
Critério 6 - custo de operação e manutenção (RC=0,09616)										
	GTV	GTG	GMT	MCA	GMS	GCC	CRM	CBM	CCC	PR
GTV	1,000	3,000	4,000	6,000	6,000	0,500	7,000	7,000	9,000	0,233
GTG	0,333	1,000	0,500	5,000	5,000	0,250	5,000	6,000	7,000	0,127
GMT	0,250	2,000	1,000	5,000	5,000	0,200	5,000	6,000	7,000	0,138
MCA	0,167	0,200	0,200	1,000	3,000	0,143	2,000	4,000	6,000	0,062
GMS	0,167	0,200	0,200	0,333	1,000	0,143	0,500	2,000	5,000	0,038
GCC	2,000	4,000	5,000	7,000	7,000	1,000	7,000	8,000	9,000	0,311
CRM	0,143	0,200	0,200	0,500	2,000	0,143	1,000	3,000	5,000	0,047
CBM	0,143	0,167	0,167	0,250	0,500	0,125	0,333	1,000	4,000	0,028
CCC	0,111	0,143	0,143	0,167	0,200	0,111	0,200	0,250	1,000	0,016
Critério 7 - capacidade de geração (RC=0,02069)										
	GTV	GTG	GMT	MCA	GMS	GCC	CRM	CBM	CCC	PR
GTV	1,000	1,000	0,200	0,143	0,200	0,333	1,000	1,000	1,000	0,038
GTG	1,000	1,000	0,200	0,143	0,200	0,333	1,000	1,000	1,000	0,038
GMT	5,000	5,000	1,000	0,250	1,000	3,000	5,000	5,000	5,000	0,177
MCA	7,000	7,000	4,000	1,000	4,000	5,000	7,000	7,000	7,000	0,363
GMS	5,000	5,000	1,000	0,250	1,000	3,000	5,000	5,000	5,000	0,177
GCC	3,000	3,000	0,333	0,200	0,333	1,000	3,000	3,000	3,000	0,094

Tabela 4.6 – Determinação do peso entre as alternativas

(continuação)

	GTV	GTG	GMT	MCA	GMS	GCC	CRM	CBM	CCC	PR
CRM	1,000	1,000	0,200	0,143	0,200	0,333	1,000	1,000	1,000	0,038
CBM	1,000	1,000	0,200	0,143	0,200	0,333	1,000	1,000	1,000	0,038
CCC	1,000	1,000	0,200	0,143	0,200	0,333	1,000	1,000	1,000	0,038

Critério 8 - acesso à tecnologia (RC=0,04662)

	GTV	GTG	GMT	MCA	GMS	GCC	CRM	CBM	CCC	PR
GTV	1,000	1,000	4,000	3,000	4,000	7,000	6,000	6,000	7,000	0,261
GTG	1,000	1,000	4,000	3,000	4,000	7,000	6,000	6,000	7,000	0,261
GMT	0,250	0,250	1,000	0,333	1,000	5,000	3,000	3,000	4,000	0,089
MCA	0,333	0,333	3,000	1,000	3,000	6,000	5,000	5,000	6,000	0,161
GMS	0,250	0,250	1,000	0,333	1,000	5,000	3,000	3,000	4,000	0,089
GCC	0,143	0,143	0,200	0,167	0,200	1,000	0,333	0,333	0,500	0,022
CRM	0,167	0,167	0,333	0,200	0,333	3,000	1,000	1,000	3,000	0,045
CBM	0,167	0,167	0,333	0,200	0,333	3,000	1,000	1,000	3,000	0,045
CCC	0,143	0,143	0,250	0,167	0,250	2,000	0,333	0,333	1,000	0,027

Critério 9 - comercialização de subproduto (RC=0)

	GTV	GTG	GMT	MCA	GMS	GCC	CRM	CBM	CCC	PR
GTV	1,000	9,000	9,000	9,000	9,000	9,000	1,000	9,000	9,000	0,360
GTG	0,111	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,111	1,000	1,000	0,040
GMT	0,111	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,111	1,000	1,000	0,040
MCA	0,111	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,111	1,000	1,000	0,040
GMS	0,111	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,111	1,000	1,000	0,040
GCC	0,111	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,111	1,000	1,000	0,040
CRM	1,000	9,000	9,000	9,000	9,000	9,000	1,000	9,000	9,000	0,360
CBM	0,111	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,111	1,000	1,000	0,040
CCC	0,111	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,111	1,000	1,000	0,040

Critério 10 - comercialização de créditos de carbono (RC=0,04042)

	GTV	GTG	GMT	MCA	GMS	GCC	CRM	CBM	CCC	PR
GTV	1,000	0,333	0,500	0,250	0,333	0,200	0,200	0,167	0,143	0,024
GTG	3,000	1,000	2,000	0,333	1,000	0,200	0,200	0,167	0,143	0,042
GMT	2,000	0,500	1,000	0,333	0,500	0,333	0,333	0,200	0,167	0,036
MCA	4,000	3,000	3,000	1,000	3,000	0,500	0,500	0,250	0,200	0,082
GMS	3,000	1,000	2,000	0,333	1,000	0,200	0,200	0,167	0,143	0,042
GCC	5,000	5,000	3,000	2,000	5,000	1,000	1,000	0,500	0,333	0,132
CRM	5,000	5,000	3,000	2,000	5,000	1,000	1,000	0,500	0,333	0,132
CBM	6,000	6,000	5,000	4,000	6,000	2,000	2,000	1,000	0,500	0,210
CCC	7,000	7,000	6,000	5,000	7,000	3,000	3,000	2,000	1,000	0,300

Critério 11 - impactos socioambientais (RC=0,0148)

	GTV	GTG	GMT	MCA	GMS	GCC	CRM	CBM	CCC	PR
GTV	1,000	1,000	0,500	0,333	1,000	0,250	0,250	0,200	0,167	0,035

Tabela 4.6 – Determinação do peso entre as alternativas

	GTV	GTG	GMT	MCA	GMS	GCC	CRM	CBM	CCC	PR
GTG	1,000	1,000	0,500	0,333	1,000	0,250	0,250	0,200	0,167	0,035
GMT	2,000	2,000	1,000	0,500	2,000	0,333	0,333	0,250	0,200	0,056
MCA	3,000	3,000	2,000	1,000	3,000	0,500	0,500	0,333	0,250	0,086
GMS	1,000	1,000	0,500	0,333	1,000	0,250	0,250	0,200	0,167	0,035
GCC	4,000	4,000	3,000	2,000	4,000	1,000	1,000	0,500	0,333	0,131
CRM	4,000	4,000	3,000	2,000	4,000	1,000	1,000	0,500	0,333	0,131
CBM	5,000	5,000	4,000	3,000	5,000	2,000	2,000	1,000	0,500	0,200
CCC	6,000	6,000	5,000	4,000	6,000	3,000	3,000	2,000	1,000	0,292

(conclusão)

Fonte: próprio autor

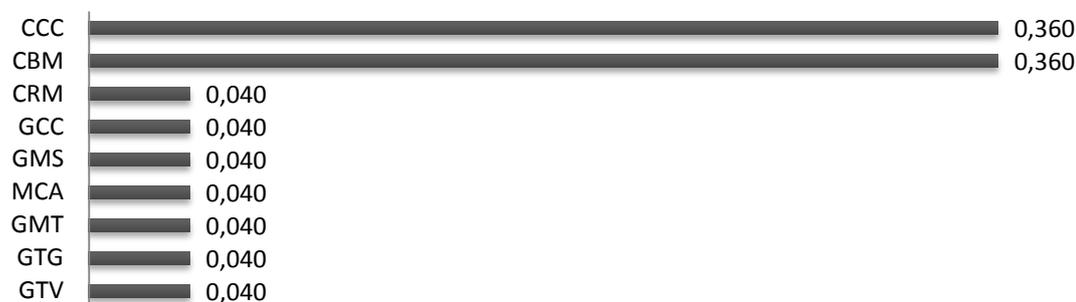
As Figuras 4.2 a 4.13 apresentam os resultados finais das PR de todos os critérios.

Figura 4.2 – Resultado das prioridades relativas segundo o critério eficiência elétrica



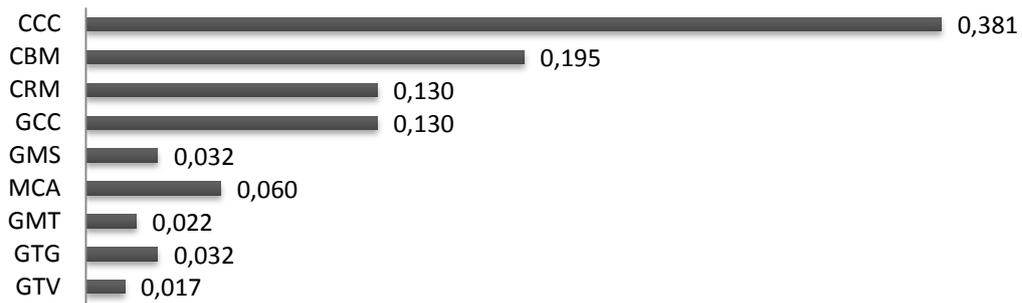
Fonte: próprio autor

Figura 4.3 – Resultado das prioridades relativas segundo o critério eficiência térmica



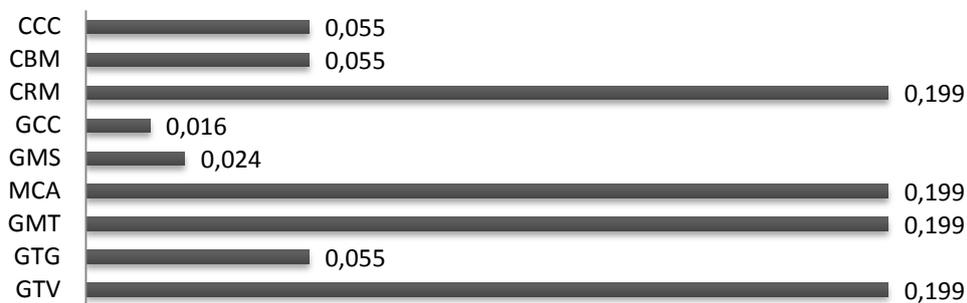
Fonte: próprio autor

Figura 4.4 – Resultado das prioridades relativas segundo o critério FUE



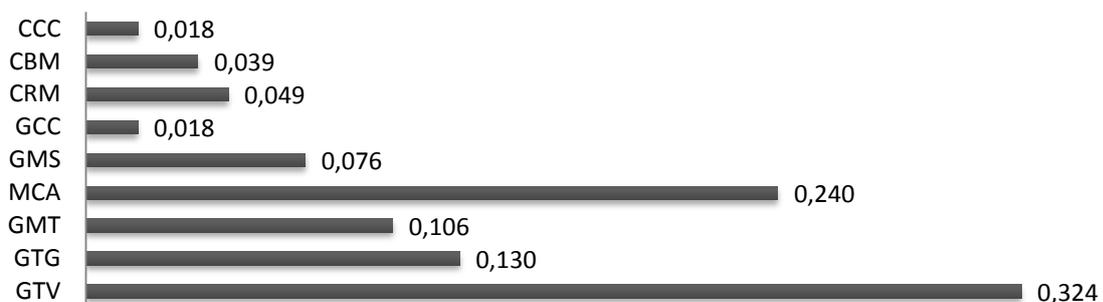
Fonte: próprio autor

Figura 4.5 – Resultado das prioridades relativas segundo o critério vida útil



Fonte: próprio autor

Figura 4.6 – Resultado das prioridades relativas segundo o critério custo de instalação



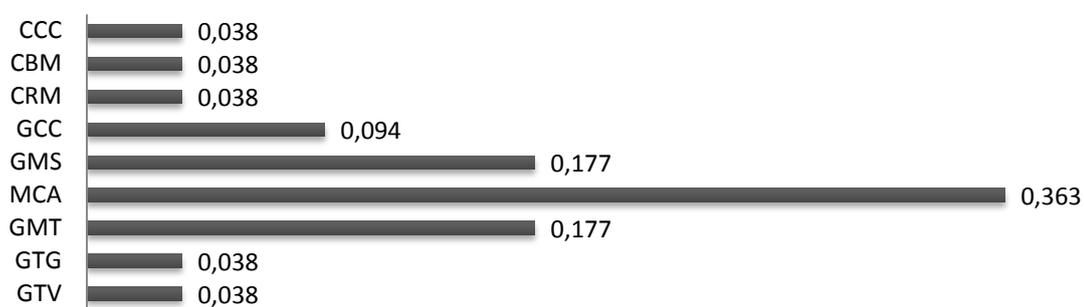
Fonte: próprio autor

Figura 4.7 – Resultado das prioridades relativas segundo o critério custo de operação e manutenção



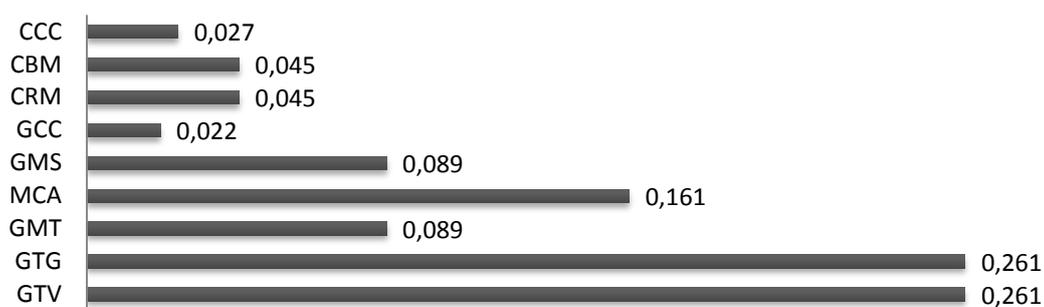
Fonte: próprio autor

Figura 4.8 – Resultado das prioridades relativas segundo o critério capacidade de geração



Fonte: próprio autor

Figura 4.9 – Resultado das prioridades relativas segundo o critério acesso à tecnologia



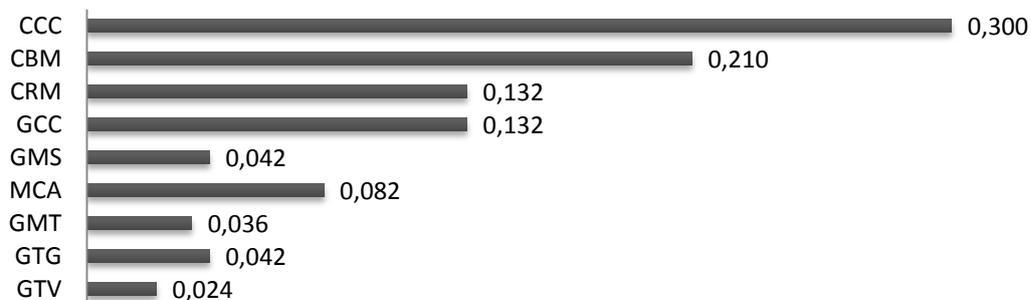
Fonte: próprio autor

Figura 4.10 – Resultado das prioridades relativas segundo o critério comercialização de subproduto



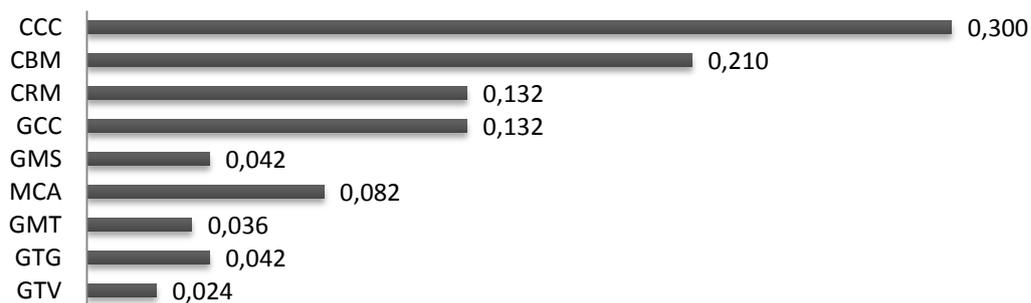
Fonte: próprio autor

Figura 4.11 – Resultado das prioridades relativas segundo o critério comercialização de créditos de carbono



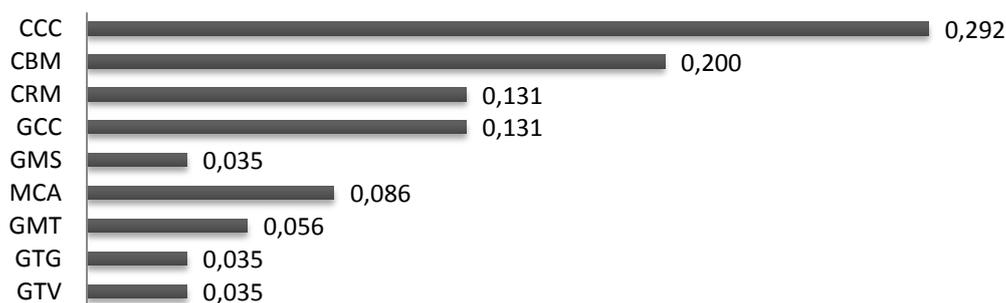
Fonte: próprio autor

Figura 4.12 – Resultado das prioridades relativas segundo o critério comercialização de créditos de carbono



Fonte: próprio autor

Figura 4.13 – Resultado das prioridades relativas segundo o critério impactos sociambientais



Fonte: próprio autor

Na sequência deste estudo de caso, de forma semelhante, constrói-se a MCP atribuindo um peso relativo entre os critérios e calcula-se também a PR e CR. Neste momento são estabelecidos os Cenários 1 e 2 alusivos à situação real condizente com os interesses do AD e com relevância socioambiental (de caráter comparativo), respectivamente. A Tabela 4.7 apresenta as informações referentes aos dois cenários.

Tabela 4.7 – Determinação do peso entre os critérios

(continua)

Cenário 1 - avaliação do AD (RC=0,05187)												
	EE	ET	FUE	VU	CI	O&M	CG	AT	CS	CC	SA	PR
EE	1.00	2.00	2.00	0.17	0.13	0.14	0.20	0.50	0.25	0.33	3.00	0.88
ET	0.50	1.00	1.00	0.14	0.13	0.13	0.17	0.33	0.20	0.25	2.00	0.53
FUE	0.50	1.00	1.00	0.14	0.13	0.13	0.17	0.33	0.20	0.25	2.00	0.53
VU	6.00	7.00	7.00	1.00	0.25	0.33	2.00	5.00	3.00	4.00	7.00	3.87
CI	8.00	8.00	8.00	4.00	1.00	3.00	4.00	7.00	5.00	6.00	8.00	5.64
O&M	7.00	8.00	8.00	3.00	0.33	1.00	3.00	6.00	4.00	5.00	8.00	4.85
CG	5.00	6.00	6.00	0.50	0.25	0.33	1.00	4.00	2.00	3.00	7.00	3.19
AT	2.00	3.00	3.00	0.20	0.14	0.17	0.25	1.00	0.33	0.50	4.00	1.33
CS	4.00	5.00	5.00	0.33	0.20	0.25	0.50	3.00	1.00	2.00	6.00	2.48
CC	3.00	4.00	4.00	0.25	0.17	0.20	0.33	2.00	0.50	1.00	5.00	1.86
AS	0.33	0.50	0.50	0.14	0.13	0.13	0.14	0.25	0.17	0.20	1.00	0.32
Cenário 2 - relevância socioambiental (RC=0,08281)												
	EE	ET	FUE	VU	CI	O&M	CG	AT	CS	CC	SA	PR
EE	1.00	1.00	0.33	4.00	6.00	6.00	5.00	5.00	6.00	6.00	0.20	0.12
ET	1.00	1.00	0.33	4.00	6.00	6.00	5.00	5.00	6.00	6.00	0.20	0.12
FUE	3.00	3.00	1.00	5.00	7.00	7.00	6.00	6.00	7.00	7.00	0.25	0.18
VU	0.25	0.25	0.20	1.00	5.00	5.00	4.00	4.00	5.00	5.00	0.14	0.08
CI	0.17	0.17	0.14	0.20	1.00	1.00	0.25	0.33	0.50	0.50	0.11	0.02
O&M	0.17	0.17	0.14	0.20	1.00	1.00	0.14	0.33	0.50	0.50	0.11	0.02

Tabela 4.7 – Determinação do peso entre os critérios

(conclusão)

	EE	ET	FUE	VU	CI	O&M	CG	AT	CS	CC	SA	PR
CG	0.20	0.20	0.17	0.25	4.00	7.00	1.00	3.00	3.00	3.00	0.14	0.06
AT	0.20	0.20	0.17	0.25	3.00	3.00	0.33	1.00	2.00	2.00	0.13	0.04
CS	0.17	0.17	0.14	0.20	2.00	2.00	0.33	0.50	1.00	1.00	0.11	0.02
CC	0.17	0.17	0.14	0.20	2.00	2.00	0.33	0.50	1.00	1.00	0.11	0.02
AS	5.00	5.00	4.00	7.00	9.00	9.00	7.00	8.00	9.00	9.00	1.00	0.32

Fonte: próprio autor

Por fim, cria-se a matriz dos resultados finais referente a cada cenário em questão, resultante da interação entre as matrizes apresentadas na Tabela 4.6 e Tabela 4.7. A Tabela 4.8 apresenta a matriz resultante dos Cenários 1 e 2.

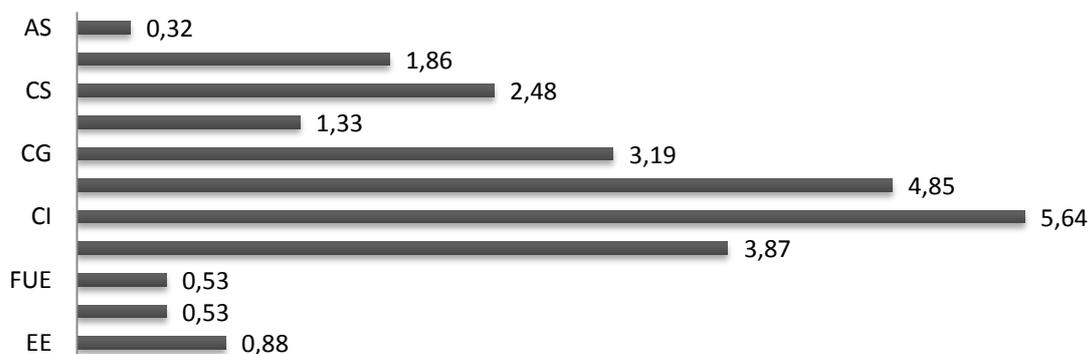
Tabela 4.8 – Matriz resultante do Cenário 1 e Cenário 2

Cenário 1 – avaliação do AD											
	EE	ET	FUE	VU	CI	O&M	CG	AT	CS	CC	SA
GTV	0,003	0,005	0,003	0,016	0,006	0,004	0,002	0,009	0,009	0,001	0,011
GTG	0,007	0,005	0,006	0,004	0,002	0,002	0,002	0,009	0,001	0,001	0,011
GMT	0,004	0,005	0,004	0,016	0,002	0,002	0,010	0,003	0,001	0,001	0,018
MCA	0,014	0,005	0,011	0,016	0,004	0,001	0,021	0,006	0,001	0,002	0,027
GMS	0,007	0,005	0,006	0,002	0,001	0,001	0,010	0,003	0,001	0,001	0,011
GCC	0,031	0,005	0,024	0,001	0,000	0,005	0,005	0,001	0,001	0,003	0,042
CRM	0,003	0,005	0,024	0,016	0,001	0,001	0,002	0,002	0,009	0,003	0,042
CBM	0,007	0,044	0,036	0,004	0,001	0,000	0,002	0,002	0,001	0,005	0,063
CCC	0,047	0,044	0,070	0,004	0,000	0,000	0,002	0,001	0,001	0,007	0,092
Cenário 2 – relevância socioambiental											
	EE	ET	FUE	VU	CI	O&M	CG	AT	CS	CC	SA
GTV	0,001	0,001	0,000	0,028	0,092	0,047	0,004	0,011	0,029	0,001	0,001
GTG	0,002	0,001	0,001	0,008	0,037	0,026	0,004	0,011	0,003	0,002	0,001
GMT	0,001	0,001	0,000	0,028	0,030	0,028	0,019	0,004	0,003	0,002	0,001
MCA	0,003	0,001	0,001	0,028	0,068	0,013	0,040	0,007	0,003	0,005	0,001
GMS	0,002	0,001	0,001	0,003	0,022	0,008	0,019	0,004	0,003	0,002	0,001
GCC	0,007	0,001	0,003	0,002	0,005	0,062	0,010	0,001	0,003	0,008	0,002
CRM	0,001	0,001	0,003	0,028	0,014	0,009	0,004	0,002	0,029	0,008	0,002
CBM	0,002	0,007	0,004	0,008	0,011	0,006	0,004	0,002	0,003	0,012	0,003
CCC	0,011	0,007	0,008	0,008	0,005	0,003	0,004	0,001	0,003	0,017	0,004

Fonte: próprio autor

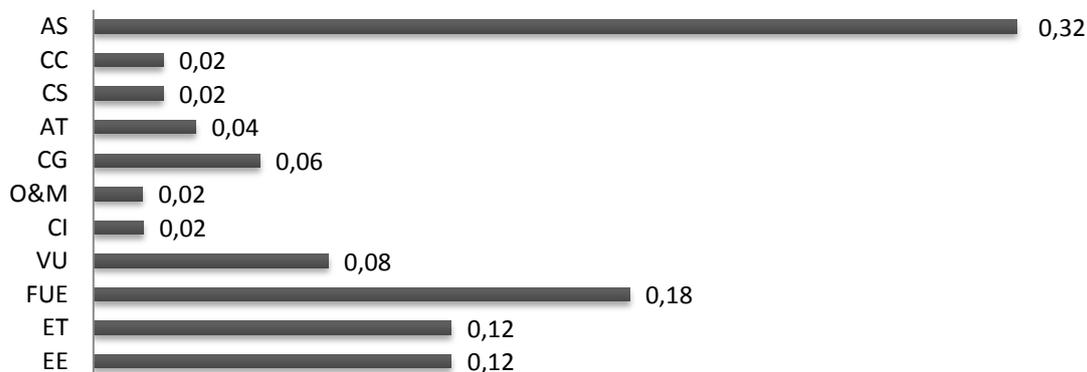
As Figuras 4.14 e 4.15 apresentam os resultados finais das PR das alternativas referentes ao Cenário 1 e 2, respectivamente.

Figura 4.14 – Resultado das prioridades relativas segundo a avaliação das alternativas na ótica do Cenário 1



Fonte: próprio autor

Figura 4.15 – Resultado das prioridades relativas segundo a avaliação das alternativas na ótica do Cenário 2



Fonte: próprio autor

4.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

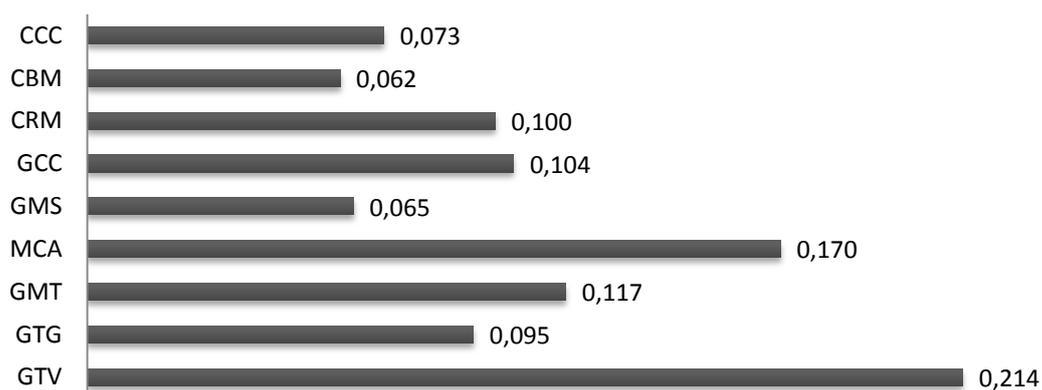
A classificação final (CL) da aplicação da metodologia de auxílio à tomada de decisão para seleção tecnológica de fontes de minigeração distribuída utilizando a casca de arroz, como também o resultado das simulações das prioridades relativas finais (PRF) nos dois cenários, tendo como referência o estudo de caso da indústria de beneficiamento de arroz, pode ser visualizada na Tabela 4.9 e nas Figuras 4.16 e 4.17.

Tabela 4.9 – Classificação final conforme a ótica dos cenários

Tecnologia	Cenário 1 – avaliação do AD		Cenário 2 - socioambiental	
	PRF	CL	PRF	CL
GTV	0,214	1°	0,068	6°
GTG	0,095	6°	0,051	8°
GMT	0,117	3°	0,065	7°
MCA	0,170	2°	0,107	4°
GMS	0,065	8°	0,048	9°
GCC	0,104	4°	0,118	3°
CRM	0,100	5°	0,106	5°
CBM	0,062	9°	0,166	2°
CCC	0,073	7°	0,270	1°

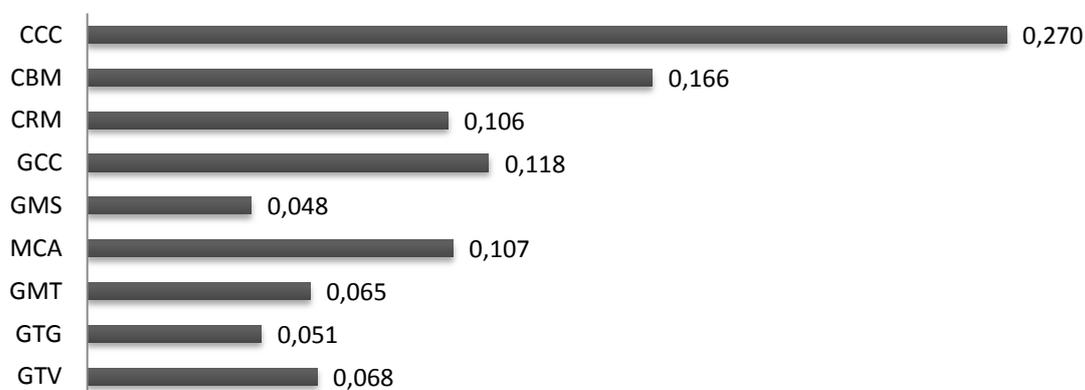
Fonte: próprio autor

Figura 4.16 – Resultado final do Cenário 1



Fonte: próprio autor

Figura 4.17 – Resultado final do Cenário 2



Fonte: próprio autor

No primeiro cenário, de acordo com os resultados apresentados na Tabela 4.9, conclui-se que a turbina a vapor seria selecionada como sendo a melhor opção tecnológica de geração. É válido ressaltar que este cenário foi criado baseando-se nos interesses do AD, figurado pelo diretor industrial, ponderando as avaliações dos *stakeholders*. Os fatores que contribuíram para este resultado estão diretamente relacionados aos indicadores econômicos, considerados preponderantes na ótica do AD: o menor custo de instalação, o segundo menor custo de operação e manutenção, e a maior vida útil, dentre todas as alternativas. Além disso, a casca do arroz carbonizada, subproduto resultante do processo de transformação da biomassa no ciclo a vapor, possui um elevado valor monetário de mercado, segundo informações do AD, o que eleva, portanto, o interesse estratégico pela tecnologia e o diferencial frente às demais alternativas. Os motores de combustão alternativos seriam a segundo melhor opção tecnológica de geração neste cenário, muito embora apresente índices superiores à turbina a vapor no que diz respeito aos critérios socioambientais, vinculados à eficiência elétrica, ao fator de utilização de energia, à capacidade de geração, e aos créditos de carbono. Seguindo a mesma linha de raciocínio, a geração com microturbinas e com células a combustível, obtiveram a terceira e a quarta colocação na classificação geral, respectivamente, adquirindo destaque frente às demais alternativas. Portanto, nas quatro primeiras colocações foi possível constatar em ordem prioritária: o ciclo Rankine, o ciclo Otto, o ciclo Brayton, e, por fim, o processo eletroquímico.

Por outro lado, no segundo cenário, cuja relevância está voltada sobretudo aos fatores sociais e ambientais, a alternativa tecnológica que teve maior destaque foi a cogeração com ciclo combinado. Apesar de ter os maiores custos de instalação, operação e manutenção em função da geração combinada de potência elétrica e térmica, esta alternativa teve a maior nota agregada em função do aproveitamento energético da biomassa residual, e um maior consequente benefício ambiental. O fato de esta alternativa apontar para um fator de utilização de energia superior frente às outras tecnologias apresentadas se deve ao aproveitamento energético e eficiência no processo de transformação da biomassa. Tal processo dispõe da utilização de turbinas a gás e a vapor para geração de potência elétrica. Além disso, há a disponibilidade e oferta da potência térmica residual oriunda do processo termodinâmico para abastecimento da demanda industrial. Na segunda posição ficou a tecnologia da cogeração com ciclo Brayton montante utilizando turbina a gás. Esta alternativa, muito embora tenha custos de instalação, operação e manutenção menores quando comparada à primeira colocada, apresenta índices de eficiência elétrica e térmica inferiores.

Na terceira e quarta posição, estão as células a combustível e motores de combustão alternativos, respectivamente.

Diante dos dois cenários de simulação expostos é possível observar que não há uma única solução ótima e absoluta para os mesmos, tendo em vista que cada AD possui sua visão para o empreendimento no que tange os seus interesses. Evidentemente que estes interesses, voltados aos critérios de avaliação das possíveis alternativas são influenciados diferentemente, uma vez que há interação com as partes interessadas, tal como o poder público, a secretaria do meio ambiente, a concessionária de energia elétrica e as empresas terceirizadas. Por isso, o modelo apresentado, bem como os resultados encontrados, proporciona ao AD não somente uma resposta mais apropriada para os seus interesses, como também uma ferramenta de auxílio na tomada de decisão final do projeto. Finalmente, é possível constatar que as duas tecnologias que tiveram maior destaque, enquadrando-se entre as quatro melhores alternativas nos dois cenários de simulação, foram: os motores de combustão alternativos e a células a combustível.

4.7 RESUMO DO CAPÍTULO

Este capítulo apresenta e detalha a aplicação da metodologia desenvolvida nesta dissertação para um estudo de caso em uma indústria de beneficiamento de arroz, localizada no município de Itaqui – RS. Para isso foi necessário estabelecer o potencial energético da biomassa residual para posterior geração de potência elétrica e térmica. Na sequência, foram estabelecidas nove alternativas de geração, avaliadas sob a avaliação de onze critérios de seleção, das ordens técnica, econômica e socioambiental. Diante de dois cenários de simulação, um atribuindo os interesses do AD figurado pelo diretor industrial e outro considerando fatores de relevância socioambiental, foram encontradas as alternativas de maior relevância para seleção: turbina a vapor e cogeração com ciclo combinado, respectivamente.

5. CONCLUSÃO

Com os resultados apresentados nesta dissertação foi possível evidenciar que o aproveitamento bioenergético da casca de arroz para minigeração distribuída em indústrias de beneficiamento de arroz pode ser uma alternativa tanto sustentável no quesito empreendimento, quanto promissora nos níveis de expansão e oferta de energia renovável. É válido ressaltar que apenas no estado do Rio Grande do Sul há um potencial para triplicar a atual capacidade de geração instalada usando minigeração com casca de arroz. Além do mais, no que diz respeito ao meio ambiente, salienta-se que há uma mitigação das emissões de gases do efeito estufa. Deve-se isto ao destino mais usual dos resíduos que possuem característica de baixa densidade e gerados em engenhos de forma contínua ao longo do ano, que é a compostagem em aterros ou grandes áreas desabitadas. Enfatizam-se também as vantagens relacionadas ao aproveitamento bioenergético, tais como: a autossuficiência no que tange as demandas de energia elétrica e térmica da indústria; a possibilidade de agregar novas fontes de renda voltadas à comercialização da eletricidade excedente, aos créditos de carbono e ao subproduto (casca de arroz carbonizada); a inserção de novas fontes renováveis ao sistema elétrico; e aos benefícios sociais, tais como a geração de empregos, a criação de novos mercados e desenvolvimento local. Estes motivos remetem a necessidade de iniciativas constantes voltadas à área de P&D, de modo a alavancar e desenvolver o aparato científico, como também de demonstrar a viabilidade técnica e econômica na utilização de novas fontes de energias renováveis e da geração distribuída oriunda de biocombustíveis.

No âmbito da competitividade entre as empresas, é fundamental que a tomada de decisão para criação de empreendimentos ligados aos novos mercados faça parte de um processo que envolva todas as áreas da organização, que atenda aos interesses locais e que promova o desenvolvimento global. Além disso, é indispensável que os projetos também estabeleçam conceitos ligados à sustentabilidade, isto é, que incorporem medidas para garantir

o equilíbrio entre os pilares econômico, social e ambiental. Percebe-se, portanto, o desejo da construção de um modelo com resolução lógica, contendo alternativas, metas e critérios definidos, muito embora a tomada de decisão multicriterial seja cognitiva em muitos casos, baseada apenas em critério tangíveis e/ou intangíveis arbitrados pelo agente de decisão. Neste sentido, a finalidade desta dissertação foi a de criar um modelo que fizesse uso de técnicas multicriteriais para auxílio à tomada de decisão. A partir delas, foi possível obter uma resposta final de prioridade, apresentando a solução mais satisfatória que pode, ou não, ser adotada para o estabelecimento da ação. Neste método incorporaram-se os interesses do agente de decisão, diante de uma série de critérios em prol de uma análise global do processo decisório. O método AHP utilizado nesta dissertação para seleção das alternativas tecnológicas de minigeração distribuída utilizando a casca de arroz, proporcionou uma modelagem aberta e de fácil implementação, de modo que o AD participasse de todas as etapas do desenvolvimento da simulação, agregando com clareza as suas preferências. Tais medidas propiciaram a obtenção de um resultado final de forma mais clara e harmoniosa, colaborando, portanto, para o gerenciamento e escolha das fontes de minigeração distribuída. Estes são os motivos que levaram o método AHP a ser o preferido e utilizado em diversas pesquisas. É válido complementar ainda que todas as observações levantadas por Bana (2008) foram atendidas nesta dissertação, principalmente no que tange à razão de consistências dos julgamentos efetuados nas matrizes de comparação paritária. Cabe ainda enfatizar que, mesmo atendendo a regularidade e a consistência da avaliação, não é possível obter um grau de consciência do agente de decisão no âmbito do contexto organizacional. Com relação às críticas e restrições do método, às quais inclusive já foram apontadas em outros trabalhos, estão vinculadas principalmente à conversão da escala verbal para a numérica e à restrição de escala. Por fim, relata-se que poderia ser utilizado um software para facilitar a obtenção dos resultados, porém, conforme mencionado, optou-se pela participação direta e ativa do AD.

Finalmente, quanto ao estudo de caso, a metodologia desenvolvida foi aplicada num estudo de caso de uma indústria de beneficiamento de arroz, localizada na cidade de Itaqui - RS, no extremo oeste gaúcho, maior região produtora de arroz no Brasil. Para consolidar a capacidade de geração foram consideradas as seguintes premissas, entendidas como conservadoras no tange à estimativa do potencial: crescimento de produção de 5% nos próximos dez anos; menor poder calorífico inferior ao encontrado na bibliografia, tendo como referência a tolerância máxima admissível de umidade no momento do recebimento dos grãos de arroz; a menor disponibilidade mensal de resíduos (informação obtida no levantamento de dados), tornando-a referência para o cálculo anual; ao índice de reaproveitamento da biomassa

residual para outros fins energéticos que foi superior à média de mercado, inclusive o da própria indústria do estudo de caso; e ao menor rendimento elétrico e térmico encontrados na bibliografia. Portanto, diante de todas estas diretrizes, arbitrou-se o potencial de minigeração distribuída de 5 MW. Na sequência, foram inseridos os índices quantitativos das alternativas frente aos critérios referenciados em diversas bibliografias, como também índices qualitativos atribuídos pelo analista e facilitador. Dentro da contextualização do primeiro cenário, que teve como ator principal o AD, figurado pelo diretor industrial, a alternativa que teve maior destaque foi a turbina a vapor, seguida dos motores de combustão alternativos e das microturbinas. No segundo cenário, criado para realizar uma comparação com o cenário real, e tendo como prioridade os critérios de relevância socioambiental, a alternativa que teve o maior destaque foi a cogeração com ciclo combinado, seguida da cogeração a ciclo Brayton montante e da geração com células a combustível.

5.1 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES

As principais contribuições desta dissertação estão voltadas ao desenvolvimento e aprimoramento das técnicas multicriteriais para auxílio à tomada de decisão em empreendimento de minigeração distribuída utilizando a casca de arroz. A metodologia proposta busca identificar e compreender a complexidade do processo decisório, relacionados à obtenção do potencial bioenergético, ao envolvimento dos atores (agente de decisão, facilitador, analista e partes interessadas), aos critérios qualitativos e quantitativos das possíveis alternativas de minigeração distribuída. O modelo genérico aqui descrito permite, de um lado, avaliar preliminarmente as oportunidades, mediante o levantamento de dados da disponibilidade de resíduos, e de outro, enquadrar os interesses do AD para obtenção dos melhores resultados no que diz respeito à tomada de decisão.

5.2 SUGESTÕES DE CONTINUIDADE

Inicialmente, é válido enfatizar a necessidade da revisão constante das informações quantitativas e qualitativas levantadas nesta dissertação, tendo em vista a atualização e a evolução tecnológica das alternativas, às quais, por consequência, influenciam a variação dos índices de ordem técnica e econômica. Por esta razão, a solução final proporcionaria resultados mais satisfatórios e próximos à realidade. Ademais, para a aplicação da metodologia multicriterial, podem ser combinados e acrescentados critérios de natureza técnica, econômica ou socioambiental, aquém dos sugeridos pelo analista. Estes critérios

adicionais poderiam proporcionar uma maior amplitude na análise multicriterial, auxiliando ainda mais à tomada de decisão. Segue a relação de alguns exemplos de critérios econômicos que poderiam ser utilizados: *payback*, Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR). No entanto, cabe alertar que para inserir os critérios exemplificados deve ser considerado um conjunto fatores de risco adicionais à análise (tais como as variáveis cambiais e de inflação, o custo de venda da eletricidade produzida, a política e os interesses/incentivos governamentais e as novas tecnologias, por exemplo) que, por sua vez, podem aumentar o grau de complexidade da análise e reduzir a confiabilidade do resultado final.

Ainda, há a possibilidade de se comparar a viabilidade de geração utilizando a casca de arroz com outras fontes renováveis, tais como os aerogeradores (energia eólica), as células fotovoltaicas (energia solar), o ciclo Kalyna (energia geotérmica), energia maremotriz. Pode-se acrescentar, ainda, com outros tipos de biomassa, como os resíduos sólidos urbanos, os resíduos advindos de estações de tratamento de esgoto, capim de elefante, licor negro, bagaço da cana-de-açúcar, dendê, entre outros.

Como sugestão para comparação dos resultados obtidos pelo método AHP, poderiam ser utilizados outros métodos multicriteriais para auxílio à tomada de decisão, como, por exemplo, o ELECTRE, PROMETHEE, MACBETEH, conforme apresentados no Capítulo 2. Ou, ainda, visando aperfeiçoar o modelo, principalmente nos índices dos critérios qualitativos, os quais foram convertidos para informações numéricas, poderiam ser combinados com outros métodos, como a lógica difusa e as redes neurais, com o método AHP. Tal associação tornaria a análise ainda mais completa.

Para facilitar a interação do AD e difundir o conhecimento na área empresarial, poderia também ser desenvolvido um *software* para cálculo de geração das potências elétrica e térmica de indústrias de beneficiamento de arroz. Através de uma ferramenta computacional, poderiam ser incrementadas outras tecnologias, critérios, ferramentas para tomadas de decisão, sugeridas nesta seção, colaborando para a confiabilidade e gerenciamento da seleção multicriterial.

Nesta dissertação foram consideradas as análises de empreendimentos voltados à minigeração distribuída utilizando a casca de arroz. No entanto, utilizando a mesma ferramenta de análise multicriterial poderiam ser avaliados outros empreendimentos que fazem uso de biomassa, principalmente as fontes com potencial de crescimento, tais como os resíduos sólidos urbanos e resíduos advindos das estações de tratamento de esgoto, por exemplo.

5.3 PUBLICAÇÕES RELACIONADAS AO TRABALHO

No decorrer do Mestrado, até o momento, foram publicados os seguintes trabalhos:

Artigo publicados:

1. COSTA, A. K., FARRET, F. A., TRENNEPOHL, F. A. **Seleção Multicriterial para sistemas de minigeração distribuída utilizando a casca de arroz.** Conferência Internacional de Energias Inteligentes, do IV Seminário de Eficiência Energética e I do Congresso Brasileiro de Geração Distribuída (CBGD), 2016. Curitiba – Brasil, 2016.
2. COSTA, A. K., FARRET, F. A. **Gerenciamento e seleção de fontes de minigeração distribuída utilizando casca de arroz baseado em uma metodologia multicriterial.** VII Seminário Brasileiro de Meio Ambiente e Responsabilidade Social no Setor Elétrico (SMARS), 2016. Rio de Janeiro – Brasil, 2016.
3. COSTA, A. K., FARRET, F. A. **Seleção Multicriterial para sistemas de minigeração distribuída utilizando a casca de arroz.** XVII Encontro Regional Iberoamericano do CIGRE (ERIAC), 2017. Ciudad del Este – Paraguai, 2017.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABE, H.; KATAYAMA, A.; SAH, B.P.; TORIU, T.; SAMY, S.; PHEACH, P. **Potential for rural electrification based on biomass gasification in Cambodia**. *Biomass Bioenergy*; N°31, p. 656–64, 2007.

ACKERMANN, T.; ANDERSSON, G.; SODER, L. **Distributed generation: a definition** *Electric Power Systems Research*. Lausanne, N°57, pg. 195-204, 2001.

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

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica no Brasil**. Brasília: ANEEL. 2008.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. *Banco de Informações de Geração (BIG)*. <
<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em 18 de março de 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. *Banco de Informações de Geração (BIG)*. <
<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso em 18 de março de 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. *Banco de Informações de Geração (BIG)*. <
<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/CoGeracaoTipoFase.asp?tipo=2&fase=3>>. Acesso em 25 de março de 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional (PRODIST): Módulo 1**, 2016 <http://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo1_Revisao_9/1b78da82-6503-4965-abc1-a2266eb5f4d7> Acesso em: 10 mar. 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução Normativa N° 687** de 24 de novembro de 2015. Altera a Resolução Normativa n° 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST. Disponível em: <
<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>> Acesso em: 15 fev. 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução Normativa N° 206** de 22 de Dezembro de 2005. Estabelece as condições gerais para a contratação do suprimento de energia elétrica pelas concessionárias ou permissionárias de serviço público de distribuição do Sistema Interligado Nacional-SIN, com mercado próprio inferior a 500 GWh/ano, conforme disposições do Decreto n° 5.163, de 30 de julho de 2004. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/bren2005206.pdf>> Acesso em: 15 fev. 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução Normativa N° 77** de 18 de agosto de 2004. Estabelece os procedimentos vinculados à redução das tarifas de uso dos sistemas elétricos de transmissão e de distribuição, para empreendimentos hidroelétricos e aqueles com base em fonte solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, cuja potência injetada nos sistemas de transmissão e distribuição seja menor ou igual a 30.000 kW. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2004077.pdf>> Acesso em: 15 fev. 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução Normativa N° 21** de 20 de janeiro de 2000. Estabelece os requisitos necessários à qualificação de centrais termelétricas cogeneradoras de energia. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2006/003/documento/nota_tecnica.pdf> Acesso em: 15 fev. 2016.

ALMEIDA, A. T. **O Conhecimento e o Uso de Métodos Multicritério de Apoio a Decisão**. Editora Universitária da UFPE. 2011. 2ª Edição, 232 pg.

ALMEIDA, A. T.; COSTA, A. P. C. S. **Aplicações com Métodos Multicritério de Apoio a Decisão**. Recife: Universitária UFPE, 2003

ALMEIDA, S. R. **Pirólise rápida da casca de arroz**. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais). Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

ANGULO, M.B.B. **Experimentos da Geseificação de Casca de Arroz em Leito Fluidizado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

ANTUNES, C. H.; MARTINS, A. G. **Multi-Objective Optimization and Multi-Criteria Decision Analysis in the Energy Sector (part II – MCDA)**. European Working Group “Multiple Criteria Decision Aiding”; Series 3, n° 29, Spring, 2014.

ARCE, M. E.; SAAVEDRA, A.; MÍGUEZ, J. L., GRANADA, E. **The use of grey-based methods in multi-criteria decision analysis for the evaluation of sustainable energy systems: A review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews; 47: 924–932. 2015.

ARROYO, J. E. C. **Heurísticas e Metaheurísticas Para Otimização Combinatória Multiobjetivo**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

BALESTIERI, J. A. P. **Cogeração: geração combinada de eletricidade e calor**. Florianópolis: UFSC, 2002. 279 p.

BALESTIERI, J. A. P. **Planejamento de centrais de cogeração: uma abordagem multiobjetiva**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1994.

BANA e COSTA, C. A. **Introdução Geral às Abordagens Multicritério de Apoio à Tomada de Decisão.** *Investigação Operacional*, v.66, p. 117-139, 1988.

BANA E COSTA, C. A.; VANSNICK, J.-C.; **MACBETH – An integrate path towards the construction of cardinal value functions.** *International Transactions in Operational Research*. N°4, pg. 489-500, 1994.

BARIN, A. **Seleção de sistemas de geração de energia elétrica a partir de resíduos sólidos: uma abordagem com a lógica difusa.** Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

BARJA, G.J.A. **A Cogeração e sua Inserção ao Sistema Elétrico.** Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas). Universidade de Brasília, Brasília, 2006

BECALLI, M.; MISTRETTA, M.; CELLURA, M. **Decision-making in energy planning. Application of the ELECTRE method at regional level for the diffusion of renewable energy technology.** *Renewable Energy*, N°28, p. 2063-2087, 2003.

BELTON, V.; STEWART, T. **Multiple Criteria Decision Analysis: an integrate approach.** Norwell: Kluwer Academic Publishers, 2002.

BHAT, A.; BHEEMARASETTI, J. V. R.; RAO, T.R. **Kinetics of rice husk char gasification.** *Energy Conversion & Management*. Vol. 42, pag. 2061-2069. Pergamon, 2001.

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

BRANS, J. P.; MARESCHAL, B.; VINCKE, P. H. **PROMETHEE: a new family of outranking methods in multicriteria analysis.** In: BRANS, J. P. (editor), *Operational Research*, IFORS 84: 477-490. North Holland: Amsterdam, 1984.

BRIDGWATER, A.V. **Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass,** *Chem. Eng. J.* 91, pg. 87-102, 2003.

BRIDGWATER, A.V; PEACOCKE, G.V.C. **Fast pyrolysis processes for biomassa,** *Renew. Sust. Energy Rev.* 4, pg. 1-73, 2000.

BRIGNOL, W.S. **Contribuições à identificação de regimes operacionais eficientes de centrais geradoras a biogás oriundo de aterros sanitários.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

CAMPOS, V. R. **Modelo de apoio à decisão multicritério para priorização de projetos de saneamento.** Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

CARLOS R.M.; KHANG D. **Characterization of biomass energy projects in Southeast Asia.** *Biomass and Bioenergy*. 2007

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

CHEN, G.; ANDRIES, J.; LUO, Z.; SPLIETHOFF, H. **Effect of hot vapor filtration on the characterization of bio-oil from rice husks with fast pyrolysis in a fluidized-bed reactor.** *Bioresour Technol*; 102:6178–85. 2011.

CHENG, J.; SU, H. **Microwave-assisted alkali pretreatment of rice straw to promote enzymatic hydrolysis and hydrogen production in dark- and photo-fermentation.** *Int J Hydrogen Energy*; 36:2093–101. 2011

COELLO, C. A. C.; LAMONT, G. B.; VELDHUIZEN, D. A. V. **Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems.** New York: Springer, 2007. 610 p.

COMPANHIA NACIONAL DO ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos – Safra 2015/16 v.3.** Brasília: CONAB, 2016.

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

COSTA, A. K. **A Cogeração de Energia e a sua Inserção em Indústrias Arrozeiras Utilizando a Casca de Arroz.** Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica), Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2013.

DANTAS, G.A. **Alternativas de Investimento do Setor Sucroenergético Brasileiro para Aproveitamento de Bagaço e de Palha.** Tese (Doutorado em Planejamento Energético). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

DEMIBRAS, A. **Mechanisms of convection and secondary reaction effects within porous solid fuels undergoing pyrolysis.** *Energy Conver. Manage.* 41 pg. 633-646, 2000.

DINIZ, J. **Conversão térmica da casca de arroz abaixo temperatura: produção de bioóleo e resíduo sílico-carbonoso absorvente.** Tese (Doutorado em Química). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

DINIZ, J.; CARDOSO, A.L.; STAHL, J.A.; VILLETTI, M.A.; MARTINS, A.F.; **Poder Calorífico da casca de arroz, caroço de pêsego, serragem de eucalipto e de seus produtos de pirólise.** *Ciência e Natura*, Universidade Federal de Santa Maria, vol. 26, n° 2 pg. 25-32. Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2004.

DUARTE, G.A. **Análise de parâmetros de sustentabilidade para geração de energia elétrica com óleo vegetal em comunidades isoladas na Amazônia.** Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.

EDWARDS, W.; BARRON, F.H. **Smarts and Smarters: Improved Simple Methods for Multiattribute Utility Measurement.** *Organizational Behavior and Human Decision Process*, 60: 306-325. 1994.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Balanco Energético Nacional 2015: Ano base 2014.** Rio de Janeiro: EPE, 2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2024.** Rio de Janeiro: EPE, 2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Plano Nacional de Energia 2030**. Rio de Janeiro: EPE, 2015.

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

FIGUEIREDO, N, J, V. **Utilização de biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica - estudo de caso**. Dissertação (Mestrado em Ciências). Universidade de São Paulo, 2011.

FISHBUM, P.C. **Utility Theory for decision making**. New York: Wiley. 1970

FOLETTTO, E.L.; HOFFMANN, R.; HOFFMANN, R.S.; PORTUGAL JR., U. L.; JAHN, S.L.; **Aplicabilidade das cinzas da casca de arroz**. Revista Química Nova, vol. 28, número 6, pg. 1055 – 1060. São Paulo, SP, 2005.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. *Statistics Division 2014*. < <http://www.fao.org>>. Acesso em 20 de março de 2016.

FORTES, M. Z. **Priorização de alternativas de geração termelétrica distribuída**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

GARCIA, V. J. **Metaheurísticas multiobjetivo para o problema de restauração do serviço em redes de distribuição de energia elétrica**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

GELDERMANN, J.; OBERSCHMIDT, J.; LUDWIG, J. **Modified PROMETHEE approach for assessing energy technologies**. International Journal of Energy Sector Management; Vol. 4, N°2: 183-212. 2010.

HADDAD, J.; BOROTNI, E.C.; DIAS, M.V.X. **Geração Distribuída no Brasil: Oportunidades e Barreiras**, Revista Brasileira de Energia, vol 11, nº 2, SBPE, 2005, disponível em: <<http://www.sbpe.org.br/socios/download.php?id=187>> Acesso em fevereiro 2016.

HENRIQUES, R.M. **Potencial para Geração de Energia Elétrica no Brasil com Resíduos de biomassa através da Gaseificação**. Tese (Doutor em Planejamento Energético). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

HOFFMANN, R; MAYER, F. D; RUPPENTHAL, J.E. **Gestão Energética, Econômica e Ambiental do Resíduo da Casca de Arroz em Pequenas e Médias Agroindústrias de Arroz**. In: XIII Simpósio de Engenharia de Produção, Bauru, 2006.

HOFFMANN, R; SILVA J.C.. **O Uso do Ciclo Stirling no Aproveitamento de Fontes Térmicas**. Universidade Federal da Santa Maria, 2015.

HOFFMANN, R. **Método Avaliativo da Geração de Energia Elétrica, em Potências Inferiores a 1MWe, a partir da Gestão dos Resíduos de Biomassa – o caso da Casca de Arroz**. Tese (Doutor em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

HEO, H.S.; PARK, H.J. **Fast pyrolysis of rice husk under different reaction conditions.** J Ind Eng Chem;16:27–31. 2010.

HORLOCK, J. H. **Cogeneration – Combined Heat and Power (CHP): Thermodynamics and Economics.** Krieger Publishing Company, 1997, 246p.

KAHRAMAN, C.; KAYA, I.; CEBO, 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.

KEENEY, R.L.; RAIFFA, H. **Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-offs.** Ney York: John Wiley & Sons, Inc. 1976

LEI, Z.; CHEN, J. **Methane production from rice straw with acclimated anaerobic sludge: effect of phosphate supplementation.** Bioresour Technol; 101:4343–8. 2010.

LORA, E.S, HADDAD, J. **Geração Distribuída, Aspectos Tecnológicos, Ambientais e Intitucionais.** Editora Interciência Ltda, 2006. 240p.

LUDWIG, V. S. **Agroindústria processadora de arroz: Um estudo das principais características organizacionais e estratégias das empresas líderes.** Dissertação (Mestrado em Agronegócios). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

MACIEL, R.S. **Otimização multiobjetivo na análise da integração de geração distribuída às redes de distribuição.** Tese (Doutor em Engenharia Elétrica). Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012.

MAI THAO, P.T.; KURISU, K.H. **Greenhouse gas emission mitigation potential of rice husks for an Giang province.** Vietnam Biomass Bioenergy 35:3656–3666. 2011.

MALFA, E. **ABB on Sustainable Energy Markets.** Università di Brescia, 2002.

MANAN, Z. A. **A review on utilisation of biomass from rice industry as a source of renewable Energy** Renew Sustain Energy Rev 16:3084–3094. 2012.

MARTINS, L.F.G. **Metodologia para Despacho de Fontes de GD a Biogás em Redes de Distribuição utilizando Lógica Fuzzy.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

MAYER, F.D; HOFFMANN, R. **Quantification and use of rice husk in decentralized electricity generation in Rio Grande do Sul State, Brazil.** Clean Techn Environ Policy. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014.

MAYER, F.D. **Aproveitamento da Casca de Arroz em uma Micro Central Termoelétrica – Avaliação dos Impactos Econômicos e Ambientais para o setor Arrozeiro do Rio Grande do Sul.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

MAYER F.D.; HOFFMANN, R. **Economic sensitivity analysis applied to a micro thermal power plant from biomass, with installed capacity of 300 kW.** In: XII Congresso Brasileiro de Energia, Rio de Janeiro, pp 1361–1370. 2008.

MINISTÉRIO DE AGRICULTURA, PECÁRIA E ABASTECIMENTO – MAPA. **Projeção do Agronegócio Brasil 2014/2015 a 2024/2025**. Brasília: MAPA, 2015.

MINISTÉRIO DE AGRICULTURA, PECÁRIA E ABASTECIMENTO – MAPA. **Portaria Nº 269** de 21 de novembro de 1955. Aprova a norma a ser observada na classificação, embalagem e marcação do arroz. Disponível em: <http://www.codapar.pr.gov.br/arquivos/File/pdf/arroz269_88.pdf> Acesso em: 12 dez. 2016.

NAGAOKA, M. P. T. **Aplicação de redes neurais em análise de viabilidade econômica de cogeração de energia elétrica**. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura), Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2005.

NATARAJAN, E.; NORDIN, A.; RAO, A. **Overview of combustion and gasification of rice husk in fluidized bed reactors**. *Biomass Bioenergy*;14:533–46. 1998.

NETO, V.C. **Análise de Viabilidade da Cogeração de Energia Elétrica em Ciclo Combinado com Gaseificação de Biomassa de Cana-de-açúcar e Gás Natural**. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

OLIVEIRA, R. C. **Metodologia de análise de risco de investimento em projetos de eficiência energética com aplicação no aproveitamento da biomassa residual do dendê na Amazônia**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Pará, Belém, 2015.

PARO, André de Carvalho. **Uma metodologia para gestão de eficiência energética em centrais de cogeração a biomassa: aplicação ao bagaço de cana**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

PELLEGRINI, L. F. **Análise e otimização termo - econômica - ambiental aplicado à produção combinada de açúcar, álcool e eletricidade**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

PETROS, A.; PILAVACHI, A.; AFGAN, B. **Multi-criteria evaluation of hydrogen and natural gas fuelled power Technologies**. *Applied Thermal Engineering*. v. 29, p. 2228-2234, 2009.

PILAVACHI, P.; STILIANOS A.; STEPHANIDIS, D.; AFGANI, N. H. **Multi-criteria evaluation of hydrogen and natural gas fuelled power plant technologies**. *Applied Thermal Engineering*; 11:21-34. 2009.

POHEKAR, S. D.; RAMACHANDRAN, M. **Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning - A review**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; 8: 365–38. 2004.

POLATIDIS, H; HARALAMBOPOULOS, D. A. **Selecting an Appropriate Multi-Criteria Decision Analysis Technique for Renewable Energy Planning**. *Energy Sources, Part B*, 1:181–193, 2006.

PRETZ, R. **Potencial Bioenergético do setor Arrozeiro do Rio Grande do Sul: uma Abordagem Termoeletrica**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

PRIETO, M.G.S. **Alternativas de Cogeração na Indústria Sucro-Alcooleira, Estudo de Caso.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

QUAAK, P.; KNOEF, H.; STASSEN, H.; **Energy from Biomass – A Review of combustion and Gasification technologies.** World Bank Technical Paper n° 422. Energy Series. Washington D.C., EUA, 1999.

REIS, L. B.; SILVEIRA, S. **Energia Elétrica para o desenvolvimento sustentável.** São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2011.

REIS, L. B.; FADIGAS, E. A.; CARVALHO, C.E.. **Energia, Recursos Naturais e Prática do Desenvolvimento Sustentável.** Barueri: Manole, 2ª ed., 2012.

ROY, B. **Multicriteria Methodology for Decision Aiding.** Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1996.

ROY, B. **The outranking approach and the foundations of Electre methods.** Theory and Decision. 31: 49-73, 1991.

ROY, B. **Classement et choix en presence de points de vue multiples (lé methode ELECTRE).** Riro, v.8, p.57-65. 1968.

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

SALES, L.S. **Viabilidade Técnico-Econômica de Sistemas de Cogeração para Atender a Demandas Elétricas, Térmicas e de Refrigeração em Aplicações de Pequeno e Médio Porte.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2008.

SATHITRUANGSAK, P.; MADHIYANON, T.; SOPONRONNARIT, S. **Rice husk co-firing with coal in a short-combustion-chamber fluidized-bed combustor (SFBC).** Fuel; 88:1394–402. 2009.

SCMIDHEINTY, S. **Mudando o Rumo: Uma Perspectiva Empresarial Global sobre Desenvolvimento e Meio Ambiente.** Rio de Janeiro: Editora Fundação Getúlio Vargas. 372p. 1992

SOOKKUMNERD, C.; ITO, N.; KITO, K. **Financial viabilities of husk-fueled steam engines as an energy-saving technology in Thai rice mills.** Appl Energy; 82:64–80. 2005.

STREZOV, V.; EVANS, A.; EVANS, T. J. **Sustainability considerations for electricity generation from biomass.** Renew Sust Energy Rev; 14: 1419–1427. 2010.

STREZOV, V.; EVANS, A.; EVANS, T. J. **Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies.** Renew Sust Energy Rev;13:1082–8. 2009.

TAHA, R. A.; DAIM, T. **Multi-Criteria Applications in Renewable Energy Analysis, a Literature Review.** Research and Technology Management in the Electricity Industry, Green Energy and Technology, London, 2013.

VELÁZQUEZ, S. M. S. G. **Perspectivas para a Geração de Excedentes de Energia Elétrica no Segmento de Papel e Celulose com Otimização de Sistemas de Gaseificação/turbinas a gás.** Tese (Doutorado em Energia), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006

VIEIRA, A. C. **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas para geração de energia.** Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura). Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012.

VINCKE, P. **Multicriteria decision-aid.** New York: John Wiley, 1992.

WANG, J. J.; JING, Y. Y.; ZHANG, C, F.; ZHANG, X. T. **Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making.** Renewable and Sustainable Energy Reviews ;13: 2263–2278. 2009.

WANG, J. J.; JING, Y. Y.; ZHANG, C, F.; ZHANG, X. T. **A fuzzy multi-criteria decision-making model for trigeneration system.** Energy Policy; 36: 3823–3832. 2008.

WU, D.W.; WANG, R.Z. **Combined cooling, heating and power: A review.** Progress in Energy and Combustion Science, v. 32, p. 459- 495, 2006.

YIN, X.L.; WU, C.Z.; ZHENG, S.P.; CHEN, Y. **Design and operation of a CFB gasification and power generation system for rice husk.** Biomass Bioenergy; 23:181–7. 2002.

ZELENY, M. **Multiple Criteria Decision Making.** New York: MacGraw-Hill. 1982

APÊNDICE A – RESOLUÇÃO NORMATIVA N° 21 DA ANEEL

Em 20/01/2000, a ANEEL publicou a Resolução Normativa N° 21, que estabeleceu as condições para qualificação das centrais termelétrica cogedoras, isto é, um “certificado de excelência” para as centrais que atendam níveis mínimos de eficiência exergética. Quanto à diferença entre a cogeração e a cogeração qualificada, fica claro que:

- Cogeração: processo operado numa instalação específica para fins da produção combinada das utilidades calor e energia mecânica, esta geralmente convertida total ou parcialmente em energia elétrica, a partir da energia disponibilizada por uma fonte primária;
- Cogeração qualificada: atributo concedido a cogedores que atendem os requisitos definidos nesta Resolução, segundo aspectos de racionalidade energética, para fins de participação nas políticas de incentivo à cogeração;

A resolução estabelece requisitos mínimos para considerar uma central de cogeração qualificada, mediante o comprimento da inequação A.1 e A.2.

$$\frac{E_t}{E_f} \geq 15\% \quad (\text{A.1})$$

$$\left(\frac{E_t}{E_f} \right) \div X + \frac{E_c}{E_f} \geq Fc\% \quad (\text{A.2})$$

onde:

- Energia da fonte (E_f): energia recebida pela central termoelétrica de cogeração, no seu regime operativo médio, em kWh/h, com base no conteúdo energético específico, que no caso dos combustíveis é o Poder Calorífico Inferior (PCI);
- Energia da utilidade eletromecânica (E_e): energia cedida pela central termoelétrica cogedora, no seu regime operativo médio, em kWh/h, em termos líquidos, ou seja, descontando da energia bruta gerada o consumo em serviços auxiliares elétricos da central;
- Energia da utilidade calor (E_t): energia cedida pela central termoelétrica cogedora, no seu regime operativo médio, em kWh/h, em termos líquidos, ou seja, descontando das energias brutas entregues ao processo as energias de baixo potencial térmico que retornam à central;

- Fator de cogeração ($F_c\%$): parâmetro definido em função da potência instalada e da fonte da central termoelétrica cogeneradora (de acordo com a Tabela 2), o qual aproxima-se do conceito de Eficiência Exergética;
- Fator de ponderação (X): parâmetro adimensional definido em função da potência instalada e da fonte da central termoelétrica cogeneradora, obtido da relação entre a eficiência de referência da utilidade calor e da eletromecânica, em processos de conversão para obtenção em separado destas utilidades (de acordo com a Tabela A.1).

Tabela A.1 - Fatores de ponderação (X) e cogeração ($F_c\%$)

Fonte/potência elétrica instalada	X	F_c%
Derivados de Petróleo, Gás Natural e Carvão:		
Até 5 MW	2,14	41
Acima de 5 MW e até 20 MW	2,13	44
Acima de 20 MW	2,00	50
Demais combustíveis:		
Até 5 MW	2,50	32
Acima de 5 MW e até 20 MW	2,14	37
Acima de 20 MW	1,88	42
Calor recuperado de processo:		
Até 5 MW	2,60	25
Acima de 5 MW e até 20 MW	2,17	30
Acima de 20 MW	1,86	35

Fonte: ANEEL (2000)

APÊNDICE B – LEVANTAMENTO DE DADOS: ESTUDO DE CASO

Formulário de levantamento de dados para o estudo de caso					
Empresa avaliada					
Localização					
Capacidade de produção (kg/hora)					
Produção de arroz e casca de arroz (ano de 2015):					
Mês	Arroz (t)	Casca de arroz (t)			Farelo (t)
		Total	Consumida	Sobra	
Janeiro					
Fevereiro					
Março					
Abril					
Mai					
Junho					
Julho					
Agosto					
Setembro					
Outubro					
Novembro					
Dezembro					
Total					
Proporção de produtos e subprodutos (ano de 2015)					
Produtos/subprodutos		Porcentagem da produção			
Arroz					
– Integral					
– Parboilizado					
– Polido					
– Quebrado e canjição					
Casca de arroz					
Quirera					
Farelo de arroz					
Porcentagem média anual utilizada da casca de arroz para fins energéticos					

Porcentagem e disponibilidade de sobra da casca de arroz		
Consumo e demanda elétrica (ano 2015):		
	Mês	Demanda (MW)
	Consumo total (MWh)	
	Janeiro	
	Fevereiro	
	Março	
	Abril	
	Maio	
	Junho	
	Julho	
	Agosto	
	Setembro	
	Outubro	
	Novembro	
	Dezembro	
Regime operacional (ano 2015):		
	Mês	Dias úteis
	Horas trabalhadas	
	Janeiro	
	Fevereiro	
	Março	
	Abril	
	Maio	
	Junho	
	Julho	
	Agosto	
	Setembro	
	Outubro	
	Novembro	
	Dezembro	
	Total	
Fator de utilização da indústria	$FU = \frac{RO}{8.760} =$	
Perspectiva de crescimento de produção anual		

APÊNDICE C – FORMULÁRIO PARA AGENTE DE DECISÃO

Formulário para avaliação do cenário

Empresa do agente de decisão

Formação do agente de decisão

Considerações iniciais: tendo como modelo a Tabela C.1 e a Tabela C.2, referente às alternativas tecnológicas¹ e os critérios de avaliação², responda o questionário abaixo.

Tabela C.1 – Base de dados de critérios quantitativos

Critérios	EE	ET	FUE	VU	CI	O&M
Alternativas	(%)	(%)	(%)	(anos)	(US\$/kW)	(US\$/kWh)
GTV	25	-	25	20	1000	0,004
GTG	30	-	30	15	2000	0,010
GMT	28	-	28	20	2200	0,009
MCA	35	-	35	20	1200	0,012
GMS	30	-	30	10	2500	0,014
GCC	50	-	50	8	6000	0,001
CRM	25	25	50	20	3000	0,013
CBM	30	25	55	15	3500	0,017
CCC	55	20	75	15	6000	0,027

Tabela C.2 – Base de dados de critérios qualitativos³

Critérios	CG	AT	CS	CC	SA
Alternativas					
GTV	0,4	1	1	0,4	0,6
GTG	0,4	1	0	0,5	0,6
GMT	0,9	0,7	0	0,45	0,65
MCA	0,9	0,9	0	0,6	0,7
GMS	0,7	0,7	0	0,5	0,6
GCC	0,6	0,4	0	0,7	0,8
CRM	0,4	0,6	1	0,7	0,8
CBM	0,4	0,6	0	0,8	0,85
CCC	0,4	0,5	0	0,9	0,9

¹ Consideram-se as seguintes as seguintes abreviações das alternativas:

- Geração com turbinas a vapor (GTV)
- Geração com turbina a gás (GTG)
- Geração com microturbinas (GMT)
- Geração com MCA (MCA)

- Geração com Motor Stirling (GMS)
- Geração com células a combustível (GCC)
- Cogeração com ciclo Rankine montante (CRM)
- Cogeração com ciclo Brayton montante (CBM)
- Cogeração com ciclo combinado (CCC)

² Consideram-se as seguintes abreviações dos critérios:

- Eficiência elétrica (EE)
- Eficiência térmica (ET)
- Fator de utilização de energia (FUE)
- Capacidade de geração (CG)
- Acesso à tecnologia (AT)
- Vida útil (VU)
- Custo da instalação (CI)
- Custo de operação e manutenção (O&M)
- Comercialização de subproduto (CS)
- Comercialização de crédito de carbono (CC)
- Impactos socioambientais (SA)

³ As notas atribuídas aos critérios qualitativos foram definidas pelos especialista e facilitador, e variam de 0 a 1.

O agente de decisão está de acordo com os critérios considerados para avaliação do estudo de caso?	SIM	NÃO

Em caso de negativa, quais critérios poderiam ser inseridos?

Ordene abaixo os critérios conforme prioridade/interesse do agente de decisão.

1°)	2°)	3°)	4°)	5°)	6°)
7°)	8°)	9°)	10°)	11°)	

O agente de decisão está de acordo com as alternativas consideradas para avaliação do estudo de caso?	SIM	NÃO

--

Critério: eficiência térmica

	GTV	GTG	GMT	MCA	GMS	GCC	CRM	CBM	CCC
GTV	1								
GTG		1							
GMT			1						
MCA				1					
GMS					1				
GCC						1			
CRM							1		
CBM								1	
CCC									1

Critério: fator de utilização de energia

	GTV	GTG	GMT	MCA	GMS	GCC	CRM	CBM	CCC
GTV	1								
GTG		1							
GMT			1						
MCA				1					
GMS					1				
GCC						1			
CRM							1		
CBM								1	
CCC									1

Critério: acesso à tecnologia

	GTV	GTG	GMT	MCA	GMS	GCC	CRM	CBM	CCC
GTV	1								
GTG		1							
GMT			1						
MCA				1					
GMS					1				
GCC						1			
CRM							1		
CBM								1	
CCC									1

Critério: vida útil

	GTV	GTG	GMT	MCA	GMS	GCC	CRM	CBM	CCC
GTV	1								
GTG		1							
GMT			1						
MCA				1					
GMS					1				
GCC						1			
CRM							1		

	GTV	GTG	GMT	MCA	GMS	GCC	CRM	CBM	CCC
CBM								1	
CCC									1
Critério: custo da instalação									
	GTV	GTG	GMT	MCA	GMS	GCC	CRM	CBM	CCC
GTV	1								
GTG		1							
GMT			1						
MCA				1					
GMS					1				
GCC						1			
CRM							1		
CBM								1	
CCC									1
Critério: custo com operação e manutenção									
	GTV	GTG	GMT	MCA	GMS	GCC	CRM	CBM	CCC
GTV	1								
GTG		1							
GMT			1						
MCA				1					
GMS					1				
GCC						1			
CRM							1		
CBM								1	
CCC									1
Critério: capacidade de geração									
	GTV	GTG	GMT	MCA	GMS	GCC	CRM	CBM	CCC
GTV	1								
GTG		1							
GMT			1						
MCA				1					
GMS					1				
GCC						1			
CRM							1		
CBM								1	
CCC									1
Critério: acesso à tecnologia									
	GTV	GTG	GMT	MCA	GMS	GCC	CRM	CBM	CCC
GTV	1								
GTG		1							
GMT			1						
MCA				1					

