

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

**Modelo de decisão multicritério para substituição de tecnologias em
sistemas industriais aplicado ao uso eficiente de energia**

TESE SUBMETIDA À UFPE
PARA OBTENÇÃO DE GRAU DE DOUTOR
POR

ANTONIO VANDERLEY HERRERO SOLA

Orientadora: Prof^a. Caroline Maria de Miranda Mota, DSc.

RECIFE, OUTUBRO / 2011

Catalogação na fonte

Bibliotecário Marcos Aurélio Soares da Silva, CRB-4 / 1175

S684m Sola, Antonio Vanderley Herrero.

Modelo de decisão multicritério para substituição de tecnologias em sistemas industriais aplicado ao uso eficiente de energia / Antonio Vanderley Herrero Sola. - Recife: O Autor, 2011.

x, 98 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Caroline Maria de Miranda Mota.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2011.

Inclui Referências e Apêndices.

1.Engenharia de Produção. 2.Modelo Multicritério. 3.Sistemas Industriais. 4.Eficiência Energética. I. Mota, Caroline Maria de Miranda (orientadora). II. Título.

658.5 CDD (22. ed.)

UFPE
BCTG/2011-265



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

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA

DE DEFESA DE TESE DE

DOUTORADO DE

ANTONIO VANDERLEY HERRERO SOLA

**"MODELO DE DECISÃO MULTICRITÉRIO PARA SUBSTITUIÇÃO DE TECNOLOGIAS
EM SISTEMAS INDUSTRIALIS APLICADO AO USO EFICIENTE DE ENERGIA"**

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GERÊNCIA DA PRODUÇÃO

A comissão examinadora, composta pelos professores abaixo, sob a presidência
do(a) primeiro(a), considera o candidato ANTONIO VANDERLEY HERRERO SOLA
APROVADO.

Recife, 27 de outubro de 2011.

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

Profa. DENISE DUMKE DE MEDEIROS, Doutor (UFPE)

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

Prof. ANTONIO AUGUSTO DE PAULA XAVIER, Doutor (UTFPR)

Prof. MANOEL AFONSO DE CARVALHO JÚNIOR, PhD (UFPE)

AGRADECIMENTOS

- *Sobretudo agradeço a Deus pela existência e oportunidade de evolução.*
- *Agradeço à Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Câmpus Ponta Grossa, pela oportunidade de desenvolver este trabalho por meio do Doutorado Interinstitucional (DINTER/UTFPR/UFPE/CAPES, nº 01/2007).*
- *Agradeço à CAPES pelo apoio financeiro recebido no projeto DINTER.*
- *Também agradeço à Professora Caroline M. M. Mota pelo profissionalismo com que conduziu a orientação dos trabalhos.*
- *Sou eternamente grato à minha família, em especial aos meus queridos Pais (in memorian) Antônio José Sola Fernandes e Josefa Herrera Sola, pelo apoio incondicional e pela educação pautada nos valores éticos e na busca pelo conhecimento.*
- *À minha esposa Lídia, pelo apoio aos meus projetos de vida.*

RESUMO

Apesar das políticas energéticas estabelecidas por governos e instituições do mundo, o setor industrial apresenta um grande potencial para melhoria da eficiência energética por meio de substituição das tecnologias obsoletas em operação. As tecnologias energeticamente eficientes ofertadas pelo mercado estão em constante evolução, mas a sua inserção no processo produtivo encontra barreiras organizacionais. Este trabalho de pesquisa propõe um modelo de decisão multicritério para substituição de tecnologias em sistemas industriais de energia, que contribua para a transposição de barreiras organizacionais. O modelo engloba duas fases: (1) priorização e seleção das potenciais tecnologias a serem substituídas, considerando as preocupações dos setores da empresa no nível operacional; (2) a partir das tecnologias priorizadas, são analisados vários portfólios de opções, incluindo diversos fornecedores e tipos de tecnologias, com base nas preferências do decisor, visando à seleção do melhor portfólio. O modelo é aplicado em sistemas motrizes de uma indústria, onde são analisados 8 portfólios, totalizando 64 opções. Os resultados mostram um desempenho satisfatório na economia de energia. O modelo proposto e estruturado em dois níveis, iniciando pelo nível operacional, é fundamental para garantir a priorização de tecnologias importantes para o sistema produtivo, preservando os interesses da empresa. Se comparado aos modelos de energia encontrados na literatura, o modelo apresenta características diferentes e também a vantagem da inserção de barreiras organizacionais. O estudo recomenda a disseminação do modelo de decisão multicritério proposto em indústrias, como um mecanismo de melhoria da eficiência de sistemas industriais de energia.

Palavras-chave: Modelo multicritério, Apoio à decisão, Sistemas industriais, Eficiência energética.

ABSTRACT

Despite energy policies established by governments and institutions worldwide, the industrial sector presents great potential to improve the energy efficiency by means replacement of obsolete technologies in operation. The energy efficient technologies offered by the market are in constant evolution, but their insertion in the production process faces organizational barriers. This research work proposes a multicriteria decision model in order to replace technologies in industrial energy systems, contributing for transposition of organizational barriers within the management system in firms. The model comprises two steps: (1) selection of potential technologies to be replaced, regarding the firm's sectors concerns; (2) from the prioritized technologies, several portfolios of options, including diverse suppliers and technologies, are analyzed based on decision maker's utilities, in order to choose the best portfolio. The proposed model is applied in an industrial motor system where 8 portfolios with 64 options are analyzed. The results show that the model presents good performance in terms of energy saving. The proposed multicriteria decision model structured in two steps of decision, beginning by operational level, is essential to ensure the prioritization of important technologies for the production system, preserving the organization's interest. The study recommends the dissemination of the proposed multicriteria decision model in industries as an efficient mechanism for transposition of the organizational barriers for energy efficiency.

Keywords: Multicriteria model, Decision aid, Industrial systems, Energy efficiency.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Energia.....	1
1.2	Delimitação do tema.....	5
1.3	Caracterização do problema	5
1.4	Objetivos	6
1.5	Justificativas	7
1.6	Resultados esperados.....	8
1.7	Procedimentos metodológicos	9
1.8	Estrutura do trabalho	9
2	MODELAGEM ENERGÉTICA EM SISTEMAS INDUSTRIAIS	10
2.1	Sistemas industriais de energia.....	10
2.1.1	Classificação	10
2.1.2	Eficiência energética e barreiras	12
2.1.3	Gestão de energia.....	18
2.2	O processo de modelagem energética.....	18
2.2.1	Princípios	18
2.2.2	Auditoria energética.....	19
2.2.3	Modelos e métodos	20
2.3	Fatores organizacionais	22
2.3.1	No nível operacional.....	22
2.3.2	No nível de decisão	24
3	O PROCESSO DE APOIO À DECISÃO MULTICRITÉRIO	28
3.1	Histórico	28
3.2	Conceitos	28
3.3	Fases do processo decisório	29
3.4	Intervenção do Analista	30
3.4.1	O Analista e o Cliente	30
3.4.2	O Analista e o Decisor	31
3.4.3	O Analista e os <i>Stakeholders</i>	31
3.5	Métodos multicritério	32
3.5.1	MAUT.....	33

3.5.2	PROMETHEE.....	36
3.5.3	Outros métodos aplicados na área energética.....	38
3.6	Análise do capítulo	40
4	MODELO PROPOSTO PARA SUBSTITUIÇÃO DE TECNOLOGIAS EM SISTEMAS INDUSTRIAS DE ENERGIA	41
4.1	Processo de Modelagem multicritério e Modelagem de decisão energética.....	41
4.1.1	A abordagem do especialista	41
4.1.2	As ferramentas de decisão.....	42
4.1.3	A modelagem	42
4.2	Fundamentos do modelo proposto	43
4.2.1	Abordagens e métodos	43
4.2.2	Situações e princípios para aplicação do modelo.....	44
4.3	Situação I – ordenação das tecnologias.....	45
4.3.1	Critérios técnicos	47
4.3.2	Critérios financeiros	48
4.3.3	Aggregação dos critérios para recomendação: ordenação das tecnologias	49
4.4	Situação II – seleção de portfólio	50
4.4.1	Decisão operacional	51
4.4.2	Decisão final	51
4.5	Análise do capítulo	54
5	APLICAÇÃO DO MODELO NA INDÚSTRIA	55
5.1	Sistemas motrizes	55
5.2	Perfil da empresa estudada.....	57
5.3	Aplicação do modelo na situação I	59
5.3.1	Definição dos parâmetros.....	60
5.3.2	Dados dos setores.....	61
5.3.3	Ordenação dos motores	65
5.4	Aplicação do modelo na situação II	66
5.5	Análise dos resultados	70
5.5.1	Análise da situação I	70
5.5.2	Análise da situação II	73
5.6	Análise do capítulo	75

6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	78
6.1	Resultados e contribuições do modelo.....	78
6.2	Comparações com outros modelos.....	81
6.3	Limitações e recomendações.....	82
6.4	Sugestões para trabalhos futuros.....	83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		84
APÊNDICE 1 – Portfólios.....		96
APÊNDICE 2 – Telas do <i>software D-sight</i>		98

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Oferta Interna de Energia no Brasil por fonte (EPE, 2010).....	2
Figura 1.2 – Percentual do uso de eletricidade por setor (EPE, 2010).....	3
Figura 1.3 – Evolução da energia útil no Brasil (EPE, 2010).....	3
Figura 3.1 – Tipos de funções de preferência (Brans & Marechal, 2005)	38
Figura 4.1 – Modelo para ordenação de tecnologias (elaboração do autor)	46
Figura 4.2 – Modelo para seleção de portfólios (Proposta do Autor)	50
Figura 5.1 – Eficiências de motores de indução WEG, 4 polos (WEG, 2011).....	56
Figura 5.2 – Energia economizada em função da ordenação (elaboração do Autor)	70
Figura 5.3 – Plano Gaia (<i>software D-Sight</i>).....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1– Destinação percentual de energia elétrica final por setor industrial.....	12
Tabela 2.2 – Evolução de rendimentos energéticos médios de uso final.....	13
Tabela 5.1 – Ganhos típicos de eficiência de motores em indústria	56
Tabela 5.2 – Parâmetros dos motores da indústria estudada.....	61
Tabela 5.3 – Dados dos motores elétricos da indústria estudada.....	62
Tabela 5.4 – Matriz de avaliação dos motores a serem ordenados	64
Tabela 5.5 – Ordenação completa dos motores estudados.....	66
Tabela 5.6– Portfólios de opções de tecnologias a serem analisados	67
Tabela 5.7– Níveis dos atributos estabelecidos pelo decisor	67
Tabela 5.8– Intervalos para interpolação dos valores dos atributos.....	68
Tabela 5.9 – Valores da programação linear.....	69
Tabela 5.10 – Utilidades marginais.....	69
Tabela 5.11 – Utilidades dos motores nos portfólios.....	69
Tabela 5.12 – Ordenação dos motores em cada nível.....	74
Tabela 5.13– Comparativo entre portfólios com opções de tecnologias	74

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tem o objetivo de apresentar a importância do tema energia, a delimitação, o problema de pesquisa, os objetivos do trabalho, as justificativas, os resultados esperados e os procedimentos metodológicos da pesquisa.

1.1 Energia

O tema energia, por ser essencial para o desenvolvimento econômico e social, tem um papel relevante para a sustentabilidade e é um grande desafio global ao lado de outros temas como pobreza, segurança e mudanças climáticas, segundo as Nações Unidas (UN, 2010). O tema é dividido em três grandes áreas: acesso à energia; energia renovável; eficiência energética.

Estima-se que 28% da população dos países em desenvolvimento não tenham acesso à energia elétrica. Este fato tem impactos negativos principalmente na saúde humana, pelo uso de outras formas nocivas de energia. Dentre os motivos para o desenvolvimento de energia renovável estão: a segurança do suprimento pela diversificação da matriz energética, a redução dos gases de efeito estufa e a geração de emprego e renda. A melhoria da eficiência energética também é importante para a segurança do suprimento de energia, além de contribuir para a redução das emissões e para o aumento da competitividade do setor produtivo (UN, 2010).

Para muitas indústrias, a energia é apenas mais um insumo no processo produtivo e o seu custo representa em média menos que 5% dos custos de produção, embora esse percentual seja bem maior se forem considerados outros fatores de impacto na produção (Russel, 2005). As paradas da produção e o desperdício de material devido ao desempenho das tecnologias implicam em perda de tempo e recursos financeiros, além de comprometer prazos de entrega e a qualidade dos produtos. Esses fatores têm implicações diretas junto aos clientes e podem comprometer a competitividade das organizações.

O setor produtivo pode utilizar a energia tanto na forma primária como secundária, dependendo do energético. A energia primária é encontrada na forma natural, como hidráulica, eólica, solar, petróleo, gás natural, lenha, carvão mineral, etc. A energia secundária é oriunda do processamento da energia primária, que pode resultar em: combustível como gasolina ou diesel, no caso do petróleo; etanol e biodiesel que são combustíveis renováveis;

eleticidade, que pode ser obtida a partir de fonte renovável ou não renovável. Segundo a *International Energy Agency* (IEA, 2008), a demanda de energia primária mundial deverá crescer em torno de 1,6% ao ano nas próximas décadas. Além de investimentos relacionados à infraestrutura na área energética, serão necessários fortes investimentos em tecnologias ligadas ao uso eficiente de energia, levando-se em conta, principalmente, a necessidade de redução de gases de efeito estufa.

Muitos sistemas de geração de energia nas indústrias utilizam energias não renováveis. O uso de energias alternativas – eólica, solar, etc. – pelas indústrias, pode contribuir significativamente para a redução das emissões. Considerando as diversas fontes de energia, o Brasil produz 46,8% de energias renováveis contra 53,2% de não renováveis. Com relação à eletricidade, em torno de 85% da energia gerada vem de fontes renováveis, sem contar que parte da geração térmica é originada da biomassa. No mundo, a maior parte da energia elétrica é de origem não renovável. A maior parte da geração no Brasil é de origem hidroelétrica, portanto, renovável. O parque eólico brasileiro vem crescendo, mas ainda representa um percentual inexpressivo. O gráfico da Figura 1.1 mostra a Oferta Interna de Energia no Brasil por fonte (EPE, 2010).

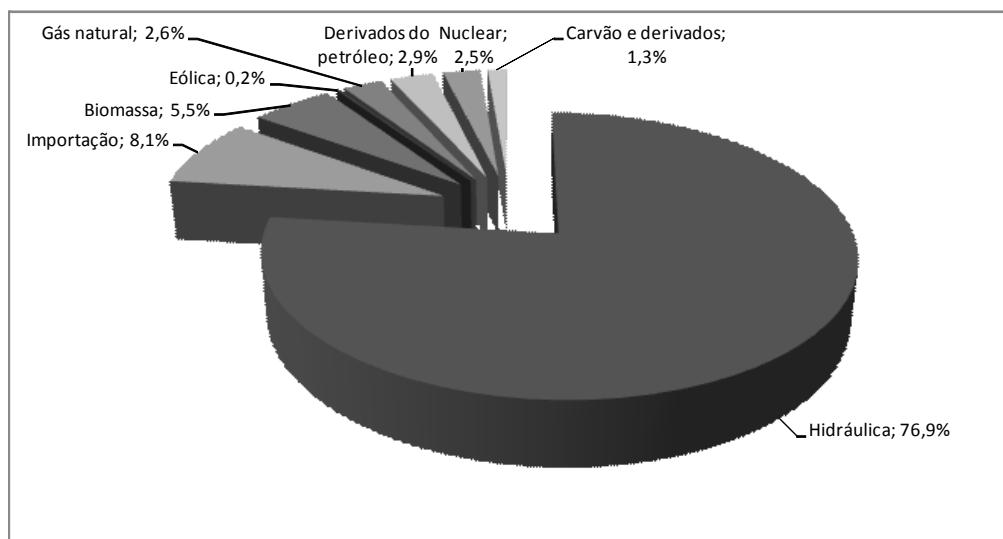


Figura 1.1 – Oferta Interna de Energia no Brasil por fonte (EPE, 2010)

O setor industrial brasileiro consome quase a metade da eletricidade oferecida no Brasil, conforme mostra o gráfico da Figura 1.2. No mundo, as indústrias são responsáveis por um terço da energia consumida (IEA, 2009).

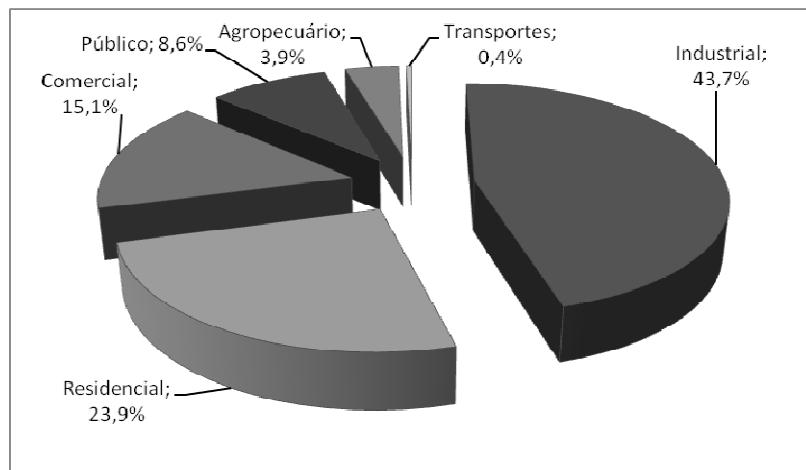


Figura 1.2 – Percentual do uso de eletricidade por setor (EPE, 2010)

No processo de conversão de energia existem perdas nos usos finais. A energia útil, que pode ser obtida pela multiplicação da energia final consumida pelo rendimento da conversão de energia, ou eficiência da conversão, é a diferença entre a energia total consumida e as perdas da conversão (Brasil, 2007; MME, 2005a). Tem havido melhoria dos rendimentos médios nos usos finais, mas o potencial de economia de energia ainda é da ordem de 15%. O gráfico da Figura 1.3 mostra a evolução da energia útil no Brasil (EPE, 2010), considerando a escala do gráfico em tonelada equivalente de petróleo (tep).

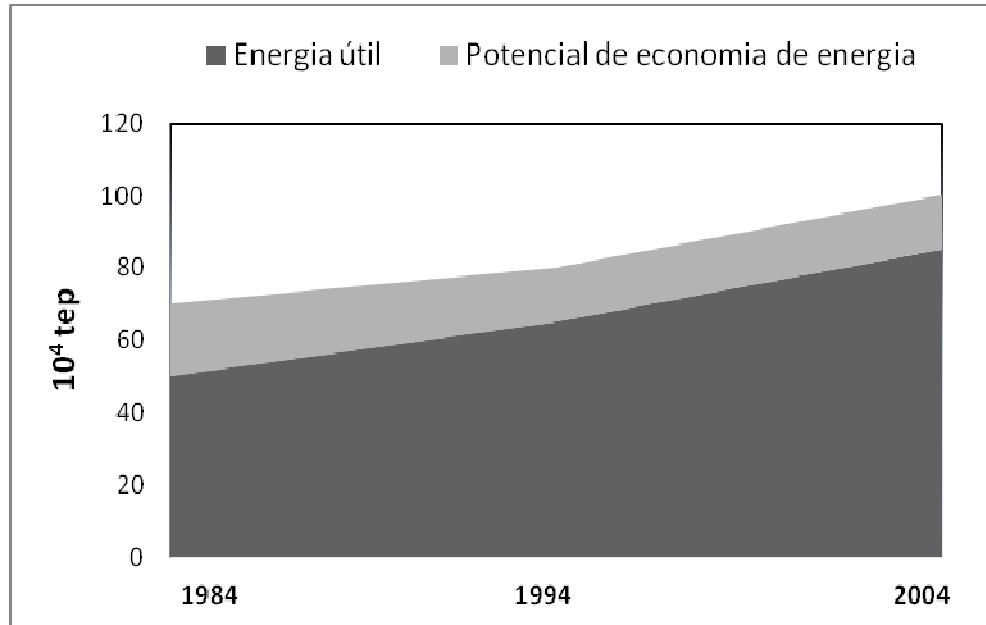


Figura 1.3 – Evolução da energia útil no Brasil (EPE, 2010)

Muitas políticas têm sido adotadas no mundo para a promoção da eficiência energética (Geller *et. al.*, 2006; Thollander *et al.*, 2007). As principais políticas nos Estados Unidos, Japão, Europa e Brasil são: Pesquisa & Desenvolvimento de produtos energeticamente eficientes; normas estabelecendo níveis mínimos de eficiência; incentivos financeiros para adoção de medidas energeticamente eficientes; assistência técnica por meio de programas governamentais; acordos voluntários com empresas. O estímulo às ações voluntárias por parte das empresas pode ser um meio de acelerar a transferência e a difusão de tecnologias energeticamente eficientes nas indústrias, segundo Okazaki & Yamaguchi (2011). Para Hu (2007), os acordos voluntários com o setor industrial podem ser um meio de melhorar a eficiência energética e reduzir as emissões de gases de efeito estufa.

Os mecanismos de fomento à eficiência energética no Brasil seguem o exemplo de outros países, com foco no mercado. De acordo com o Ministério das Minas e Energia (Brasil, 2007, p. 139), “apenas os atuais mecanismos de mercado não têm sido suficientes para promover os desejáveis e possíveis incrementos de eficiência no uso final da energia”. Dentre os mecanismos indutivos estão: tributação reduzida para produtos energeticamente eficientes; facilidades de crédito para troca de equipamentos; facilidades de crédito para substituição de energéticos. Os mecanismos compulsórios exigem níveis mínimos de eficiências obrigatórios para equipamentos, veículos e edifícios, além da obrigação contratual das empresas distribuidoras de energia elétrica de investirem um percentual de sua receita em Programas de Eficiência Energética, conforme Lei no 9.991, de 24 de julho de 2000.

Cabe destacar que, no caso dos motores de indução, a utilização facultativa dos índices mínimos de eficiência, conforme o decreto 4508/2002, que regulamenta a Lei 10295/2001, resultou em apenas 5% de motores de alto rendimento nas indústrias (Garcia, 2003), mesmo com a ação no mercado das Empresas de Serviços de Conservação de Energia (ESCOs) e de outros mecanismos de incentivos. Esse comportamento das empresas levou o Governo Federal a optar por um mecanismo compulsório, proibindo a partir de 2010 a fabricação de motores tipo padrão (*standard*) maiores ou iguais a 1HP (MME, 2005b). Porém, como os motores operam por 15 anos ou mais, os motores tipo *standard* comercializados até 2009 podem ser usados por um longo tempo. Além disso, considerando a prática de rebobinamento e reutilização de motores (Almeida, 1998; McCoy & Douglass, 2000), as indústrias continuarão a usar tecnologias obsoletas, caso elas não tenham informações suficientes sobre a viabilidade de substituição dessas tecnologias por outras mais eficientes.

1.2 Delimitação do tema

Este trabalho de pesquisa atua nos usos finais de energia, especialmente com a substituição de tecnologias em sistemas industriais. Na aplicação em uma indústria, o propósito da substituição das tecnologias é a melhoria da eficiência energética nos usos finais. Existem outras maneiras de se melhorar a eficiência energética (Brasil, 2007; Marques *et al.*, 2006; Saidur, 2010; Silva *et al.*, 2005), como por exemplo, readequação do sistema de alimentação dos usos finais, melhoria da qualidade do suprimento de energia, inserção de dispositivos de controle e automação, adoção de programas de conscientização e treinamento para ações de conservação de energia, programas de manutenção preventiva e preditiva em equipamentos.

1.3 Caracterização do problema

O processo de substituição de tecnologias em operação no processo produtivo depende da transposição de barreiras organizacionais. Considerando a melhoria da eficiência energética em organizações, a ausência de informação sobre o potencial de economia de energia, bem como a falta de conscientização a respeito de sua eficiência são barreiras que impedem as ações nas empresas. A assimetria de informação é caracterizada pela informação retida em alguns setores e não disseminada para toda a empresa, o que constitui uma barreira (Weber, 1997). Isso mostra a falta de envolvimento de todos os setores da organização no processo decisório relativo ao uso de energia. A transposição dessas barreiras depende da inserção de pessoal especializado nas empresas (Tonn & Martin, 2000) e de um sistema de Gestão de energia (McKane *et al.*, 2007). Na área de gestão energética, a falta de procedimentos documentados é uma barreira, uma vez que são essenciais para garantir ações contínuas de melhoria nas empresas (Sola & Xavier, 2007).

A ausência de estratégias de médio e longo prazo constitui barreira para a melhoria da eficiência energética (Rohdin & Thollander, 2006). Falta às empresas um mecanismo que considere a evolução e a diversidade das tecnologias no mercado. As limitações financeiras também podem impedir as ações para a substituição de tecnologias nas empresas (DeGroot *et al.*, 2001). A falta de conhecimento sobre o potencial de economia de energia implica na ausência de priorização das ações ligadas ao uso eficiente de energia. Com isso, as empresas deixam de investir na melhoria da eficiência energética, redirecionando recursos para outras áreas da organização.

O foco na produção pode constituir uma barreira para ações de eficiência energética nas empresas (McKane *et al.*, 2007). Os modelos energéticos existentes são baseados em princípios de engenharia (*bottom-up*, por exemplo, que foca as tecnologias), mas não consideram as preocupações da produção, nem outras barreiras da área de energia (Fleiter *et al.*, 2011; Worrel *et al.*, 2004). Falta de pessoal especializado em energia e em tomada de decisão, falta de tempo e falta de ferramentas de gestão para gerar as informações no processo decisório também são obstáculos (Worrel *et al.*, 2001). Pesquisa mostra que as empresas acham necessário o uso de ferramentas de apoio à decisão, mas na percepção dos usuários, tais instrumentos são complicados e demandam muito tempo (Stenfors *et al.*, 2007). Isso indica a necessidade de instrumentos adequados à realidade das empresas para serem aplicados por pessoal especializado.

A presença de barreiras organizacionais para uso eficiente de energia é uma evidência da ausência de mecanismo de apoio à decisão que considere os fatores impactantes no ambiente organizacional. Uma empresa é constituída por diversos setores, como o financeiro, a engenharia, a produção, a manutenção, além de outros e, cada um, com seus objetivos e preocupações. O uso de energia tem impacto em todos esses setores e, portanto, o processo decisório é caracterizado pela atuação de diversos atores e múltiplos critérios, tanto técnicos como financeiros (Lung *et al.*, 2005; McCoy & Douglass, 2000; Marques *et al.*, 2006). Os critérios técnicos estão ligados a aspectos de confiabilidade, desempenho energético, operação e manutenção dos equipamentos. Os critérios financeiros estão ligados a custos com energia, valor de investimento e retorno financeiro das tecnologias. Os modelos de decisão multicritério auxiliam na resolução de problemas considerando critérios muitas vezes conflitantes (Vincke, 1992), que é o caso do uso de energia no processo produtivo. Entretanto, um modelo de decisão com o foco apenas na substituição das tecnologias pode não ser o bastante para resolver os problemas das empresas. Considerando o complexo ambiente organizacional, a decisão para a substituição das tecnologias nos sistemas industriais de energia tem implicações na organização como um todo. Portanto, o problema de decisão precisa ser estruturado sob uma perspectiva macro.

1.4 Objetivos

A partir da estruturação do problema, o objetivo geral deste trabalho é a proposição de um modelo de decisão multicritério para a substituição de tecnologias em sistemas industriais

de energia, que contribua para a transposição de barreiras organizacionais. Os objetivos específicos são:

- Fazer uma revisão de literatura com a finalidade de identificar as principais barreiras organizacionais para o uso eficiente de energia em sistemas industriais e elaborar uma análise comparativa entre o processo de decisão e a modelagem energética, considerando a abordagem, as ferramentas e a modelagem.
- Aplicar o modelo em um sistema industrial de energia, resultando na ordenação das tecnologias e seleção do melhor portfólio.
- Avaliar o modelo proposto por meio de análise de sensibilidade, análise GAIA e desempenho energético.

1.5 Justificativas

O tema eficiência energética é relevante em diversos aspectos. Sob o ponto de vista global, o uso eficiente de energia vem sendo discutido pela comunidade científica mundial desde os choques do petróleo a partir dos anos 70 e dos prejuízos causados ao meio ambiente (Brasil, 2007). A maior parte das emissões de CO₂ é oriunda dos combustíveis fósseis e por isso o tema eficiência energética está previsto no protocolo de Kyoto. O uso eficiente de energia também é importante para postergar investimentos na geração, transmissão e distribuição de energia, bem como aumentar a competitividade de bens e serviços (Marques *et al.*, 2006).

O estudo no setor industrial é importante, uma vez que as indústrias têm grande destaque no cenário energético mundial, pois são responsáveis em média por um terço do consumo global de energia e 40% das emissões de CO₂ do planeta, além de apresentar grandes oportunidades de melhoria da eficiência energética (Brasil, 2007; IEA, 2009; Marques *et al.*, 2006; McKane *et al.*, 2007). De acordo com a *International Energy Agency* (IEA, 2009) serão necessários fortes investimentos em tecnologias para reduzir as emissões nas próximas décadas.

A Confederação Nacional das Indústrias, com base em uma análise na última década junto ao setor industrial brasileiro, afirma que a melhoria da eficiência energética gera benefícios para as empresas e para a sociedade, mas o setor não tem sido prioridade nos

programas governamentais de eficiência energética. Os sistemas industriais de energia apresentam grandes oportunidades para a melhoria da eficiência energética (CNI, 2009).

Em função da complexidade técnica, econômica, comportamental e de estrutura organizacional, as indústrias são diferenciadas de outros setores e isso influencia fortemente o uso de energia na planta industrial. A energia é um insumo fundamental no processo de transformação de matéria-prima e processos em produtos finais, tornando o seu uso distinto entre as diversas áreas industriais e em cada empresa em particular (Worrel *et al.*, 2004).

A diversidade e a complexidade dos processos industriais, com critérios tanto técnicos como financeiros, justificam a adoção de um processo de apoio à decisão multicritério. Cada sistema industrial de energia (sistema motriz, calor de processo, aquecimento direto, etc.) exige diferentes tipos de tecnologias e energéticos (McKane *et al.*, 2007). Considerando os inúmeros processos industriais, uma planta pode ter dezenas ou centenas de tecnologias, com diferentes consumos de energia, tempo de uso e modos de operação diferentes. Cada tecnologia tem um potencial de melhoria de eficiência energética e um impacto na produção.

1.6 Resultados esperados

Com relação ao desempenho do modelo proposto, esperam-se os seguintes resultados:

- Contribuição para a transposição das barreiras organizacionais citadas na seção 1.3.
- Desempenho satisfatório na área energética: relação direta da economia de energia com a ordenação de preferências das tecnologias; ganho médio de eficiência compatível com outra referência.
- Atendimento aos interesses da organização, a serem identificados junto à empresa objeto de estudo.
- Envolvimento e contribuição de todos os setores da empresa estudada.
- Mínimo nível de interação com o decisior e demais atores, considerando que a disponibilidade do pessoal e o tempo são fatores críticos nas empresas. Como o tempo é exíguo, há que se buscar equilíbrio entre a complexidade do problema e a simplicidade da modelagem. O modelo ao mesmo tempo deve ser fiel às necessidades da empresa, mas sem se perder na complexidade do problema. O tempo de interação deve ser acordado com a empresa estudada.

1.7 Procedimentos metodológicos

Inicialmente é feita uma pesquisa exploratória (Lakatos & Marconi, 2001) para avaliar as técnicas de modelagem e os modelos existentes. Baseado nos fundamentos da Pesquisa Operacional, a construção do modelo segue as seguintes fases (Ackoff & Sasieni, 1971):

- a) **Estruturação do problema** – Nesta fase é feita uma análise comparativa entre o processo de modelagem multicritério e a modelagem de decisão energética com o objetivo de fornecer subsídios ao modelo de decisão multicritério proposto.
- b) **Construção do modelo** – O modelo proposto engloba duas etapas de decisão: operacional e decisão final. No nível operacional é utilizada uma abordagem construtiva com método *outranking* para priorização das tecnologias a serem substituídas. No nível de decisão é utilizada uma abordagem prescritiva para determinação das utilidades do decisor, com a utilização do método UTASTAR, fundamentado nos princípios do MAUT. Os métodos estão descritos na seção 3.5.
- c) **Solução do modelo** – O modelo proposto é aplicado em sistemas motrizes em uma indústria, com o objetivo de melhoria da eficiência energética.
- d) **Validação do modelo** – A validação é feita com base nos resultados esperados, previstos na seção 1.6.
- e) **Avaliação da solução** – São feitas as seguintes análises: desempenho energético; relação entre critérios e alternativas utilizando a ferramenta *Geometrical Analysis for Interactive Assistance* (GAIA); sensibilidade para testar a variabilidade da solução.

1.8 Estrutura do trabalho

Incluindo a introdução, esta tese é apresentada em seis capítulos. O Capítulo 2 descreve o processo de modelagem em sistemas industriais. O Capítulo 3 apresenta o processo de apoio de decisão multicritério. O Capítulo 4 faz uma análise comparativa entre o processo de modelagem energética e o processo de apoio à decisão multicritério e propõe um modelo de decisão multicritério para sistemas industriais de energia. O Capítulo 5 traz a aplicação do modelo em sistema motriz industrial, com os resultados e as análises pertinentes. Finalmente, o Capítulo 6 apresenta as considerações finais, a saber: contribuições do modelo; comparação com outros modelos; limitações e recomendações; sugestões para trabalhos futuros.

2 MODELAGEM ENERGÉTICA EM SISTEMAS INDUSTRIALIS

Este capítulo apresenta uma revisão da literatura sobre a modelagem de decisão energética em sistemas industriais, destacando os principais modelos na área. O processo de modelagem na área de energia compreende a intervenção feita por especialistas na planta industrial e os métodos empregados para a solução do problema de decisão. A seção 2.1 discorre sobre os sistemas industriais de energia – classificação; eficiência energética e barreiras; gestão de energia. A seção 2.2 apresenta o processo de modelagem – intervenção e métodos. A seção 2.3 faz uma síntese do capítulo, indicando as principais lacunas dos modelos existentes.

2.1 Sistemas industriais de energia

2.1.1 Classificação

Os sistemas industriais de energia fornecem o processo de aquecimento, refrigeração ou de energia elétrica necessária para a conversão de matérias-primas e fabricação de produtos finais. Segundo a classificação do Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE, 2004), os sistemas incluem aquecimento direto e indireto, refrigeração, eletricidade, iluminação, sistemas de automação, linhas de transmissão para levar combustível, vapor e eletricidade aos equipamentos, bem como sistemas de geração e co-geração de energia (reaproveitamento de energia).

No Brasil, de acordo com o Ministério das Minas e Energia (MME, 2005a), os sistemas industriais de energia são classificados conforme os seguintes usos finais:

- **Força motriz** – É a energia usada em motores elétricos ou a combustíveis e destinados ao transporte, mistura, deformação, compressão de ar, bombeamento, ar condicionado, refrigeração e outros. Os motores elétricos com potência entre 5 CV e 50 CV são encontrados em indústrias de cerâmicas, químicas, alimentos e outras. Os motores acima de 50 CV são normalmente usados pelas indústrias de Ferro-gusa e Aço; Ferro-liga; Mineração; Pelotização; Minerais não Ferrosos; Química; Açúcar; Alimentos e Bebidas; Têxtil; Papel e Celulose; Cimento.
- **Calor de processo** – O uso de energia inclui geração de vapor e o aquecimento de água e de fluidos térmicos em caldeiras, aquecedores de fluido térmico, aquecedores de água, chuveiros, torneiras elétricas e outros, que são utilizados para transferir

calor a outros processos. As caldeiras e os aquecedores industriais normalmente usam gás, óleo, carvão, bagaço de cana ou lenha como combustível e, com menor frequência, a energia elétrica.

- **Aquecimento direto** – É a energia para aquecimento por convecção ou radiação em fornos, fornalhas, estufas, fogões, aquecedores de ambiente, inclusive fornos infravermelhos. A eletricidade é consumida por secadores e fornos elétricos (resistência, indução, plasma, arco direto) utilizados nas indústrias de Ferro gusa e aço, Ferro-liga, Alumínio e Cerâmica.
- **Refrigeração e ar condicionado** – A energia elétrica usada nesse uso final (processo de compressão de vapor) é para preservação de produtos, principalmente nas indústrias de Alimentos e Bebidas, Química e Têxtil. Os equipamentos são: geladeiras industriais, centrais de refrigeração e resfriadores de água.
- **Iluminação** – Nas indústrias, o consumo de energia elétrica em iluminação normalmente não é expressivo, se comparado com outros usos finais.
- **Eletroquímica** – É a energia para processo de eletrólise, galvanoplastia e outros processos. Na indústria encontra-se basicamente em produção de alumínio e cobre (setor de não ferrosos) e de soda/cloro (setor de química).
- **Outros** – Energia utilizada em computadores, telecomunicações, máquinas de escritório, xerografia e equipamentos eletrônicos de automação e controle.

A Tabela 2.1 apresenta o percentual da destinação final de energia elétrica para diversos setores da indústria nacional, que varia em função da atividade e da empresa. A força motriz consome a maior parte de energia elétrica na maioria das indústrias. No setor de ferro-ligas o maior consumo de energia é no uso final denominado calor de processos. Já no setor de minerais não ferrosos o consumo de energia está dividido entre a força motriz, calor de processo e eletroquímica. Segundo estudo da Confederação Nacional das Indústrias (CNI, 2009), o maior potencial de economia de energia está concentrado nos seguintes usos finais: calor de processo, aquecimento direto e força motriz.

Tabela 2.1– Destinação percentual de energia elétrica final por setor industrial

Setores da Indústria	Força	Calor de	Aquecim.	Refr.	Ilumin.	Eletroq.	Outros
	Motriz	Processo	Direto				
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Cimento	98,4	0,0	0,0	0,2	1,3	0,0	0,1
Ferro-gusa e aço	83,5	1,9	5,4	0,0	3,6	5,6	0,0
Ferro-liga	2,9	0,0	96,5	0,2	0,4	0,0	0,0
Mineração-Pelotização	92,4	1,5	4,0	0,0	2,0	0,0	0,1
Minerais não ferrosos	30,3	0,0	30,5	0,0	0,2	38,9	0,1
Química	73,7	1,9	1,9	2,3	2,6	17,4	0,2
Alimentos e Bebidas	62,2	7,1	7,2	18,4	4,6	0,4	0,1
Têxtil	57,5	0,0	0,0	40,0	2,0	0,0	0,5
Papel e celulose	94,8	3,0	0,0	0,6	1,6	0,0	0,0
Cerâmica	90,0	0,0	6,4	0,0	3,6	0,0	0,0
Outros	60,3	1,5	19,4	9,2	7,5	0,0	2,1

Fonte: Balanço de Energia Útil (MME, 2005)

2.1.2 Eficiência energética e barreiras

Um produto ou processo não é energeticamente eficiente pelo fato de consumir pouca energia e, do mesmo modo, não é necessariamente ineficiente por consumir muita energia. O conceito de eficiência energética é relativo, ou seja, só é possível dizer que um produto ou processo é energeticamente eficiente comparando-o com uma referência ou um padrão normativo, afirmam os autores Meier, Olofsson & Lamberts (2002).

Apesar do termo ‘conservação de energia’ ser utilizado muitas vezes com o mesmo sentido de ‘eficiência energética’, existem diferenças conceituais. Ações de conservação de energia estão ligadas a aspectos comportamentais do consumidor em relação à economia de energia, enquanto eficiência energética indica a relação entre a energia consumida e o total de energia demandada por um uso final (Oikonomou *et al.*, 2009).

O objetivo da melhoria da eficiência energética em um uso final é a redução da quantidade de energia demandada por meio da melhoria da eficiência e, consequentemente, redução de perdas de energia, sem prejuízo à produção, qualidade, conforto ou lazer (Brasil, 2007). A substituição de uma tecnologia menos eficiente por uma energeticamente mais eficiente, para realizar a mesma tarefa e sem prejuízos, é uma ação de eficiência energética.

O acompanhamento da eficiência pode ser feito por meio de um indicador de intensidade energética, definido como a quantidade de energia usada para produzir uma unidade de um produto e varia entre produtos e setores da indústria (McKane *et al.*, 2007). O *benchmarking* entre empresas do mesmo setor pode ser utilizado para fazer a comparação do indicador de intensidade energética (Yang, 2010).

O Ministério das Minas e Energia coordenou pela primeira vez no Brasil em 1984 o Balanço de Energia Útil (BEU), desenvolvido pela Fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia – FDTE (MME, 2005a). O trabalho foi atualizado em 1994 e em 2004. O BEU mostra que tem havido melhoria dos rendimentos dos energéticos (eficiências) nos usos finais, em função do avanço tecnológico, conforme mostra a Tabela 2.2. A força motriz inclui motores elétricos e à combustão, que possuem rendimentos bem menores que os motores elétricos.

Tabela 2.2 – Evolução de rendimentos energéticos médios de uso final

USOS FINAIS	1984	1994	2004
Força motriz	39,2 %	44,0 %	47,1 %
Calor de processo	70,3 %	76,2 %	78,9 %
Aquecimento direto	42,8 %	51,6 %	56,5 %
Iluminação	49,0 %	60,2 %	66,5 %
Eletroquímica	8,1 %	16,2 %	19,5 %
Refrigeração	46,3 %	49,8 %	54,4 %

Fonte: Balanço de Energia Útil – MME (2005a).

Apenas o desenvolvimento tecnológico não é suficiente para a melhoria da eficiência energética. Ainda faltam medidas junto às empresas, não por mecanismo compulsório, mas mecanismo indutivo, no sentido da implementação do sistema de gestão de energia (McKane *et al.*, 2007), conscientização e capacitação do pessoal com relação ao uso de energia (Tonn & Martin, 2000) e, também, suporte na área de tomada de decisão (Worrel *et al.*, 2001).

A literatura indica a existência de barreiras para uso eficiente de energia em diversas áreas: Institucional; Política e regulatória; Mercado; Financeira e econômica; Organizacional; Comportamental, conscientização e informação. Os sistemas industriais continuam a oferecer oportunidades para ações relativas ao uso eficiente de energia, principalmente devido às barreiras organizacionais (McKane *et al.*, 2007). A rigor, cada barreira pode ter o seu aspecto

institucional, econômico, organizacional e comportamental. O modelo organizacional de Weber (1997) define firmas como sistemas sociais influenciados por metas, rotinas e estruturas organizacionais, sob o domínio dos decisores.

Muitas medidas para eficiência energética poderiam ser adotadas, principalmente em indústrias, e certamente contribuiriam significativamente para a redução de custos, mas essas ações dificilmente são realizadas. As medidas para eficiência energética encontram impedimentos que não aparecem nos cálculos de investimentos e que obstruem a exploração exaustiva do potencial de conservação de energia nas empresas. Esse fenômeno é conhecido entre os especialistas como *efficiency paradox* ou *energy paradox* e é uma forte evidência da existência de barreiras para o uso eficiente de energia nas organizações (DeCanio, 1998; Weber, 1997). As principais barreiras identificadas na literatura são apresentadas na sequência.

a) Decisão e estratégias

As barreiras para uso eficiente de energia não podem ser classificadas empiricamente como invisíveis, uma vez que são reais, mas não observadas, afirma Weber (1997). Um estudo feito por DeCanio (1998) mostra que o retorno do investimento é maior que o custo dos projetos em eficiência energética. O autor conclui que a teoria econômica sozinha não consegue explicar o fenômeno *efficiency paradox*, uma vez que existem impedimentos internos às organizações, ligados ao processo decisório. Para Worrel *et al.* (2001), algumas das principais barreiras para a transferência de tecnologias energeticamente eficientes nas empresas estão ligadas ao processo de tomada de decisão. DeGroot *et al.* (2001) relaciona as barreiras ao processo de decisão com relação à produção e investimento em áreas não relacionadas com energia.

Com relação à decisão para ações de eficiência energética, o decisior pode não ter todo o conhecimento e as informações necessárias sobre as oportunidades de economia de energia, custos e benefícios (Tonn & Martin, 2000). A falta de informação do decisior sobre o potencial de economia de energia é uma barreira importante (Rohdin & Thollander, 2006). Para Weber (1997) as barreiras para eficiência energética podem resultar de assimetria de informações, ou seja, quando um ou outro setor tem informação relevante para outros setores, mas não compartilham tais informações. Os decisores também podem ter preferência por objetivos não energéticos, falta de responsabilidade ou compromisso com o consumo de energia. Os

obstáculos podem ocorrer no orçamento, aquisição de um novo equipamento, serviço ou operação e manutenção. Segundo Tonn & Martin (2000), agentes externos devidamente qualificados na área energética podem auxiliar as empresas na conscientização e na identificação das oportunidades de economia de energia, contribuindo para a transposição dessas barreiras.

Estratégia de longo prazo para a aquisição de tecnologias energeticamente eficientes é uma força importante para a melhoria da eficiência energética na organização e a sua ausência pode ser uma forte barreira (Rohdin & Thollander, 2006; Sola & Xavier, 2007). Estudo mostra que a ausência de planejamento estratégico na área energética é uma barreira que depende da transposição de outras barreiras (Wang *et al.*, 2008). A existência de outras prioridades estratégicas para investimento do capital também constitui barreira em organizações (Rohdin & Thollander, 2006).

b) Custo e orçamento

A falta de conhecimento dos custos operacionais totais durante o ciclo de vida das tecnologias utilizadas pode ser uma barreira, e isso pode implicar na relutância da gerência para investimento em eficiência energética. Um ponto a ser destacado é a aquisição do equipamento com o foco apenas no custo de aquisição, mesmo com o custo de operação 80% ou mais do custo do ciclo de vida do equipamento. Isso pode acontecer devido à falta de conexão entre o orçamento para projetos, incluindo aquisição de novas tecnologias, e o orçamento para a operação dentro da gestão industrial. Se o orçamento operacional é segregado, então o custo do ciclo de vida do produto pode não influenciar na aquisição da nova tecnologia (McKane *et al.*, 2007).

A limitação financeira da empresa é uma barreira para adoção de tecnologias eficientes (DeGroot *et al.*, 2001). Para determinação das informações, a empresa tem que recorrer a um processo de auditoria energética. Esse processo pode ser caro e o custo para a obtenção das informações necessárias para a decisão de investimento em novas tecnologias torna-se uma barreira (Rohdin & Thollander, 2006). O alto custo inicial de investimento para substituição de equipamentos é uma barreira que depende de outras barreiras (Wang *et al.*, 2008). No caso de pequenas e médias empresas a falta de capital constitui uma forte barreira, que pode ser transposta com políticas governamentais de incentivo e financiamento (Nagesha & Balachandra, 2006).

c) Riscos e incertezas

O risco percebido pela adoção de nova tecnologia é importante para as empresas e também deve ser observado. A preocupação com a interrupção da produção devido à parada de equipamento, ou confiabilidade do sistema, é maior do que a preocupação com as variações futuras de preço de energia, tornando-se uma barreira para novas tecnologias (McKane *et al.*, 2007). Preços e políticas de subsídios, tecnologias futuras e qualidade das novas tecnologias também são barreiras identificadas por DeGroot *et al.* (2001). Outras barreiras incluem a falta de tempo ou outras prioridades na empresa, os riscos técnicos em relação à produção (Rohdin & Thollander, 2006).

d) Gestão

A falta de apoio da gerência pode ser uma barreira para projetos de eficiência energética e as razões para isto podem ser: foco apenas na produção (McKane *et al.*, 2007); motivo comportamental ou resistência à mudança (Nagesha & Balachandra, 2006). Se não houver apoio da gerência aos funcionários para iniciativa de projetos e, também, para treinamento e qualificação, isso pode ser uma barreira para uso eficiente de energia (Sola & Xavier, 2007). Um processo de informação para conscientização sobre ações de eficiência energética (Dias *et al.*, 2004) pode contribuir para a transposição dessa barreira e é mais fácil de executar que uma política regulatória, segundo Nagesha & Balachandra (2006).

Em uma empresa os sistemas produtivos são constantemente avaliados, adaptados e continuamente melhorados. Entretanto, o uso eficiente de energia normalmente não faz parte desse sistema de gestão, portanto não está inserido no sistema de controle e orçamento das empresas do mesmo modo que os materiais e a mão de obra, de acordo com McKane *et al.* (2007). Os sistemas industriais otimizados perdem a sua eficiência inicial ao longo do tempo e se os procedimentos de operação e manutenção não forem integrados com o sistema de gestão da qualidade e gestão da produção, isso pode implicar em perda de eficiência energética ao longo do tempo. A inserção de energia no processo das empresas pode ser integrada ao Sistema de Gestão ISO – *International Organization for Standardization* – já praticado por muitas empresas, por meio de um processo de treinamento feito por especialistas da área energética para informação e conscientização das empresas (McKane *et al.*, 2007). A adoção de procedimentos documentados de gestão energética é uma medida determinante para a melhoria da eficiência energética nas empresas, conforme estudo (Sola & Xavier, 2007).

Além do comportamento do Mercado, as práticas gerenciais – foco no desempenho técnico e na produção – para tomada de decisão constituem obstáculos para a melhoria da eficiência energética em sistemas industriais de energia, uma vez que a eficiência energética não é considerada na escolha econômica (Almeida, 1998; McKane *et al.*, 2007). A adoção de projetos na área energética depende de diversos fatores (Anderson & Newell, 2004; Lung *et al.*, 2005) e um mecanismo de decisão dentro do processo de gestão que considere os aspectos técnicos e da produção podem contribuir para a adoção de projetos.

e) Conscientização e especialização

Dentre as barreiras organizacionais que influenciam outras barreiras estão (Wang *et al.*, 2008): falta de conscientização para ações de eficiência energética; falta de pessoal especializado na área e qualificado para fazer o levantamento de melhoria da eficiência energética nas organizações, evidenciando necessidade de educação e treinamento; falta de informações e apoio tecnológico especializado na área de engenharia para fazer melhorias de eficiência energética, em vários estágios, como: planejamento, organização, implementação, avaliação, etc. A falta de experiência em tecnologias energeticamente eficientes e na área de gestão energética, mesmo com a presença de equipamentos de alta tecnologia, é uma barreira importante, mas esta depende da transposição de outras barreiras.

Uma barreira para eficiência energética destacada também por McKane *et al.* (2007) é a falta de conhecimento dos profissionais da empresa para pesquisar e avaliar processos e tecnologias energeticamente eficientes e também oportunidades de investimento em eficiência energética. Segundo o autor, é fundamental um processo de conscientização junto ao setor industrial. Com relação à conscientização para uso eficiente de energia cabe ressaltar que, em uma organização, o comportamento humano assume características próprias, uma vez que a estrutura organizacional é hierarquizada, comandada e coercitiva (Dejours, 2004). A decisão depende do nível de informação e da posição hierárquica do decisivo na estrutura organizacional (Gaveti, 2005). Desse modo, a iniciativa para ações de eficiência energética pode partir de um funcionário, mas depende do apoio da gerência e do decisivo na organização. A falta de conscientização para eficiência energética (Nagesha & Balachandra, 2006; Wang *et al.*, 2008) está ligada aos valores ou à deficiência de informações que, por sua vez, estão ligados diretamente ao processo educacional (Dias *et al.*, 2004). As Universidades podem contribuir para a transferência de conhecimento às empresas (Tonn & Martin, 2000).

2.1.3 Gestão de energia

As tecnologias usadas nos processos industriais apresentam diferenças substanciais em termos de operação e também em relação aos energéticos utilizados. A complexidade dos sistemas industriais justifica um processo de gestão energética. Devido às barreiras organizacionais, o processo de gestão de energia é crucial para o planejamento, desenvolvimento de ações de melhoria da eficiência energética e, também, redução de custos operacionais (McKane *et al.*, 2007). Um sistema de gestão de energia pode reduzir significativamente o consumo de energia (Gordic' *et al.*, 2010), principalmente se for combinado com um sistema de monitoramento (Lee *et al.*, 2011).

A melhoria contínua do desempenho quanto ao uso de energia depende do comprometimento da Alta Gerência, definida pela *International Organization for Standardization (ISO)* como uma pessoa ou grupo de pessoas que dirigem uma organização no seu mais alto nível. Atualmente a ISO 50001:2011 (ABNT, 2011) especifica requisitos com orientações para uso de Sistemas de Gestão de Energia incluindo: Planejamento energético; Implementação e operação; Monitoramento, medição e análise. De acordo com essa Norma, a organização deve assegurar às pessoas a competência, treinamento e conscientização sobre o uso de energia, bem como desenvolver e manter um perfil de energia, que deve ser documentado. Um estudo mostra que procedimentos documentados na área de energia constituem uma força propulsora para a melhoria da eficiência energética em indústrias (Sola & Xavier, 2007).

2.2 O processo de modelagem energética

Na área energética o processo de modelagem é feito por um especialista na área de energia e segue alguns princípios dentro das seguintes fases: auditoria energética, análise seguindo um método formal de decisão, elaboração de um estudo de viabilidade técnica e econômica ou um relatório com as recomendações a ser apresentado ao decisor.

2.2.1 Princípios

Com o objetivo de antever aspectos econômicos, sociais e impactos ambientais das tecnologias do sistema produtivo, os elaboradores de políticas na área energética desenvolvem modelos baseados nos seguintes princípios: *bottom-up*; *top-down* ou *híbrid* (Böhringer & Rutherford, 2008; Rivers & Jaccard, 2006). Os modelos utilizados para elaboração de

políticas energéticas também podem auxiliar os decisores dentro das empresas, segundo Worrell *et al.* (2004).

Contrários aos modelos do tipo *top-down*, que adotam uma perspectiva macroeconômica, mas não incluem opções tecnológicas nem aspectos de uso eficiente de energia (Böhringer & Rutherford, 2008), os modelos com princípio *bottom-up* consistem em avaliar inicialmente a planta industrial, considerando as tecnologias necessárias para satisfazer a demanda, com implicações no uso de energia e nos custos (Rivers & Jaccard, 2006). As tecnologias avaliadas são caracterizadas em termos de capital, custos de operação, consumo, custos de energia, desempenho e perfil de emissões. O *bottom-up*, também conhecido como *Engineering Economic Model*, segundo Worrel *et al.* (2004), considera as informações tecnológicas e o uso de energia dos equipamentos dentro das regras de decisão da empresa.

2.2.2 Auditoria energética

Na primeira fase do processo de modelagem uma ‘auditoria energética’ para levantamento dos dados é conduzida por pessoal especializado da área de energia, que pode ser ligado a programas governamentais (Anderson & Newell, 2004; Yang, 2010), ou a uma empresa prestadora de serviços na área de energia – *Energy Service Company* — ESCO (Marino *et al.*, 2010), ou à própria empresa. Portanto, a auditoria energética é um processo que utiliza conhecimentos de engenharia, conduzido por pessoal especializado, com o objetivo de verificar o uso de energia, o potencial de economia e a viabilidade econômica, conforme exemplos encontrados na literatura (AlQdah, 2010; Li Yingjian *et al.*, 2010; McWhinney *et al.*, 2005; Saidur, 2010; Saidur & Mekhilef, 2010;).

O conhecimento do pessoal da empresa em relação ao processo produtivo é uma vantagem, mas uma auditoria energética conduzida por pessoal externo é recomendada devido às dificuldades da área operacional (Kannan & Boie, 2003). A ausência de pessoal especializado na área energética é um fator crítico para as empresas (Alberts, 2007).

As tecnologias são comparadas com normas ou referências de mercado para a identificação do potencial de melhoria da eficiência energética. Em virtude do aspecto relativo do conceito de eficiência energética, as tecnologias em operação nas indústrias precisam ser comparadas com as novas tecnologias oferecidas no mercado, que estão em constante evolução. Após o processo de auditoria energética os especialistas elaboram um estudo de viabilidade técnica e econômica, com o objetivo de auxiliar a tomada de decisão para o

investimento. O estudo de viabilidade técnica compara a eficiência energética das tecnologias utilizadas na planta com as tecnologias de mercado, enquanto a viabilidade econômica avalia o capital necessário e o retorno do investimento das novas tecnologias (Marques *et al.*, 2006).

2.2.3 Modelos e métodos

A modelagem energética tem diversos propósitos, como planejamento energético, previsão de oferta e demanda, redução de emissões, otimização de sistemas de energia, etc. (Jebaraj & Iniyan, 2006). Aqui são analisados os modelos e métodos multicritério encontrados na literatura aplicados aos sistemas de energia, especificamente nos usos finais.

Uma classe de modelos foca o processo produtivo, ou seja, cada setor industrial tem um modelo específico para o seu processo de fabricação. Essa classe de modelos utiliza o método *MIND – Method for analysis of INDustrial energy systems* – proposto para a otimização de sistemas industriais de energia. O método faz uso de programação linear para minimização de custos, incluindo custos com energia, custo do investimento em tecnologia e também custo de matéria-prima. O método pode ser utilizado para elucidar algumas questões no processo produtivo, tais como: estratégia para operação ótima; operação do setor industrial em termos de custos atendendo certas condições; melhoria do processo produtivo; investigação de como as variações de preços de eletricidade e combustíveis influenciam os sistemas industriais (Karlsson, 2011). Os autores Nilsson & Söderström (1992) utilizaram o método para desenvolver um modelo específico para o setor de papel e celulose. Thollander *et al.* (2009) utilizaram o método para desenvolver um modelo para o setor de fundição. Os diferentes sistemas industriais são embutidos em cada modelo e variam entre os setores industriais.

Outra classe de modelos aplicáveis em usos finais encontrada na literatura tem como foco as tecnologias ou as fontes de energia como segue:

- Os autores Yilmaz & Dagdeviren (2011) utilizam as informações obtidas a partir do método *Fuzzy-PROMETHEE* como restrições para a aplicação do método *Zero–One Goal Programming (ZOGP)* com o objetivo de fazer seleção de equipamentos. O modelo é indicado para situações subjetivas, nas quais os critérios são obtidos a partir da experiência e convicção do decisão. A aplicação é feita em quatro estágios: (1) a equipe identifica os equipamentos, escolhe os critérios e determina os pesos; (2) aplica o *F-PROMETHEE*, com elementos fuzzy, para ordenar as tecnologias; (3) aplica o método *ZOGP*; (4) seleciona os melhores equipamentos. O argumento dos

autores para usar *ZOGP* ao invés da teoria da utilidade é a dificuldade de se construir um modelo matemático da função utilidade que represente as preferências do decisor em situações onde as informações são incompletas ou o decisor precise alcançar objetivos ou metas.

- Ghafghazi *et al.* (2010) utilizam o método PROMETHEE II para fazer um *ranking* de fontes de energia para os uso finais ligados a sistemas de calor. São analisadas opções como gás natural, biomassa, etc. Inicialmente são identificados os decisores e os *stakeholders*, depois são definidas as alternativas e os critérios – custos, emissões, etc. – para montar a matriz de avaliação e, posteriormente, fazer a ordenação. Em função do ambiente de decisão caracterizado por diversos decisores e *stakeholders*, um método de valor esperado é utilizado para determinar os pesos dos critérios. Não é feita a análise de sensibilidade no modelo. Os autores deixam claro que a função do analista é identificar as alternativas e os critérios para a aplicação do método. São identificados na literatura outros métodos multicritérios, como ELECTRE e AHP. Entretanto, sobre a escolha do método os autores afirmam que é um problema em *Multicriteria Decision Making* (MCDM), mas não apresentam uma justificativa sob o ponto de vista do contexto de decisão, das características do problema, da estrutura de preferências e da problemática. Também não justificam porque não usaram outro procedimento para agregação dos critérios, uma vez que os decisores possuem conflitos de interesses, segundo os autores.
- Önüt *et al.* (2008) aplicam o método *Analytic Network Process* (ANP), similar ao método *AHP*, para avaliar opções de fontes de energia em indústrias, como carvão, eletricidade, gás, etc. A justificativa da escolha do método é a possibilidade de trabalhar com critérios interdependentes. O ambiente de decisão na área energética estudado tem critérios do tipo compensatório (*trade off*), segundo os autores, mas não são analisados outros métodos no artigo. O modelo obtém as informações dos decisores nas empresas para identificar benefícios, oportunidade, custos e riscos, para, posteriormente, fazer a ordenação desejada. É utilizada a análise de sensibilidade com a variação dos pesos dos critérios.

2.3 Fatores organizacionais

2.3.1 No nível operacional

O foco de uma organização é o sistema produtivo (McKane *et al.*, 2007) e por consequência toda a sua estrutura está voltada para atender às necessidades da produção. Por isso, os projetos para substituição de tecnologias visando à melhoria da eficiência energética em indústrias inicialmente devem ser discutidos com a equipe interna da organização, no nível operacional, envolvendo os diversos setores, onde cada ator se preocupa com os impactos das tecnologias no seu setor (Russel, 2005). A produção está preocupada com as metas de produtividade e com a qualidade dos produtos; o setor financeiro está interessado no orçamento e retorno do investimento; a preocupação da engenharia e da manutenção consiste na confiabilidade do sistema; o setor de pessoal quer saber sobre os impactos que esses projetos terão em termos de mão de obra, como disponibilidade, contratação e qualificação. No nível operacional existem fatores técnicos e humanos que são importantes para os setores e devem ser considerados na modelagem energética, conforme segue.

a) Fatores técnicos

Existem três fatores que influenciam a escolha das tecnologias a serem consideradas em um modelo energético, de acordo com Worrel *et al.* (2004): (1) O estado e disponibilidade das tecnologias atuais e as emergentes que dependem de incentivos em P&D; (2) Os aspectos econômicos, considerando os custos do ciclo de vida para a escolha das tecnologias; (3) Regras de decisão operacional da empresa, que consideram a intensidade de energia e as taxas de desconto no cálculo dos custos.

Na produção, a grande preocupação com relação às novas tecnologias é o risco de parada da produção (Rohdin *et al.*, 2007). Outros aspectos são com relação aos impactos das tecnologias no sistema produtivo, em termos de custos da produção, qualidade do produto e confiabilidade dos novos equipamentos. Com relação aos custos, as empresas normalmente se preocupam com o custo inicial, mas a maior parte dos custos é relativa à operação durante o ciclo de vida das tecnologias (McKane *et al.*, 2007).

A avaliação da eficiência energética industrial depende da confiabilidade dos dados, da viabilidade técnica e econômica e do monitoramento e avaliação dos resultados (Tanaka, 2008). A precisão das medições é fundamental para reduzir as incertezas aumentando a

confiabilidade do projeto (Kissock & Eger, 2008). A medição com acurácia também é importante para a certificação do nível de eficiência energética para o mercado (Grobler & Heijer, 2010). O monitoramento e avaliação dos resultados mostram o impacto das ações desenvolvidas e apontam as correções necessárias.

Na planta industrial as atividades de manutenção das tecnologias desempenham um papel importante. A gestão da manutenção tem evoluído no sentido de deixar de ser apenas um apoio, mas contribuir efetivamente para os objetivos da empresa, reduzindo custo de operação e criando valor aos clientes (Sharma *et al.*, 2011). O planejamento para manutenção preventiva (Cavalcante & Almeida, 2007) bem como preditiva (Veldman *et al.*, 2011) vem ganhando espaço nas indústrias com o objetivo de manter a confiabilidade do sistema e prolongar a vida útil dos equipamentos. O tempo de vida útil remanescente de componentes e equipamentos (Mazhar *et al.*, 2007) assim como predição de falhas (Bevilacqua *et al.*, 2005;) são as preocupações da área de operação e manutenção em sistemas produtivos.

Apesar da importância dos fatores técnicos apresentados anteriormente, projetos na área energética, ou relativos a tecnologias de manufatura, têm sido focados na análise de custos ou retorno de investimento. Existem inúmeros fatores com grande impacto na produção que podem ser utilizados como critérios de decisão na área operacional. Porém, as empresas normalmente têm usado somente um ou outro critério como ferramenta de decisão, como Tempo de Retorno Simples, Valor Presente Líquido ou Taxa Interna de Retorno (Lefley *et al.*, 2004; Lung *et al.*, 2005; Yang, 2010).

b) Fatores Humanos

O processo de decisão na planta industrial exige não só conhecimento técnico, mas também depende de fatores comportamentais da equipe. Segundo a psicologia, o trabalho não só depende das prescrições impostas pela hierarquia superior, mas também da inteligência, da subjetividade de cada indivíduo dentro da organização (Dejours, 2004). Isso ocorre porque existe sempre uma lacuna entre as atividades prescritas e o mundo real do trabalho e o caminho, a cada momento, tem que ser inventado ou descoberto por quem trabalha, afirmam os psicólogos. Considerando que o trabalho é uma forma de relação social, a cooperação individual supõe um compromisso que é ao mesmo tempo técnico e social. Para que o processo de trabalho funcione, é preciso uma equipe coesa e participativa, com o

envolvimento de todos no debate coletivo, por meio das contribuições individuais das inteligências e habilidades operacionais.

A cultura organizacional é um fator importante para a melhoria da eficiência energética em indústrias (McKane *et al.*, 2007). A cultura organizacional pode ser entendida como um conjunto de valores da corporação, como objetivos e metas que influenciam as regras de decisão da empresa e são mais importantes que os valores individuais, pois agem no sentido de moldar ou filtrar as iniciativas individuais (Bansal, 2003).

A cultura da eficiência energética pode estar ligada às normas, rotinas e conhecimento tácito, segundo Palm & Thollander (2010). Os valores estabelecidos por normas, procedimentos, metas e critérios de decisão da empresa são valores típicos dos *stakeholders* dentro da organização (Wenstop & Myrmel, 2006).

2.3.2 No nível de decisão

As ações em uma organização dependem tanto dos indivíduos que trabalham na empresa como também da gerência. Estudos mostram que as ações ocorrem em uma organização se houver alinhamento entre os interesses individuais dos atores e os valores da organização (Bansal, 2003). As decisões nas empresas são tomadas por meio de heurísticas dos decisores (Gavetti & Rivkin, 2007) e as estratégias da empresa são definidas a partir dessas decisões (Krabuanrat & Phelps, 1998).

A modelagem que envolve o uso de energia é feita com princípio de engenharia, mas a decisão depende dos critérios estabelecidos pelo decisor, normalmente ligados ao desempenho econômico ou financeiro dos investimentos. No nível gerencial, as heurísticas e a estratégia são fatores decisivos na tomada de decisão, conforme segue.

a) Heurísticas

Normalmente os processos de decisão são desenhados para atender às necessidades e, ao contrário do que se pensa, o modelo racional de decisão pode não ser um propósito para os decisores, ao invés disso, os modelos mentais e a heurística são preferidos. Representação mental ou modelo mental é o modo como os gestores enxergam o mundo, enquanto a heurística orienta as soluções individuais dos gestores de acordo com seus processos cognitivos e experiências (Gavetti & Rivkin, 2007). A heurística tem um papel importante na tomada de decisão, uma vez que, para problemas complexos, é difícil encontrar a solução

ótima. Entretanto, Tversky & Kahneman (1974) alertam para possíveis erros de julgamento que algumas heurísticas estão sujeitas, principalmente aquelas que envolvem julgamentos sob incertezas, por exemplo, quando o decisor avalia a probabilidade de um evento, um cenário ou a predição de um valor.

Dentre as diversas heurísticas – experiência de casos passados, aversão ao risco, bom senso, intuição, rotina organizacional, etc. – a aversão ao risco tem se destacado na adoção de projetos na área de energia. No que diz respeito a projetos para melhoria da eficiência energética, a grande preocupação dos gestores tem sido informações sobre investimentos e o decisor, normalmente, apresenta um perfil de grande aversão ao risco (Sandberg & Söderström, 2003). Uma análise em projetos para substituição de tecnologias energeticamente eficientes em indústrias mostrou que a maioria dos projetos rejeitados o foram por razões econômicas, como alto valor do investimento inicial, retorno de investimento inadequado (Anderson & Newell, 2004). Essa rejeição também inclui dificuldades de quantificar financeiramente os projetos, indicando falta de informações para apoio à decisão. O baixo custo de implementação e o valor de energia economizada são fatores que contribuem para a alta taxa de adoção de projetos para a melhoria de eficiência energética nas indústrias.

b) Estratégia

A decisão final bem como a implementação das tecnologias energeticamente eficientes estão relacionadas com os aspectos dinâmicos da estratégia da empresa. Pode-se dizer que a estratégia é resultado das decisões que a empresa toma e o sucesso da estratégia depende da interação com o ambiente externo, das forças internas da empresa e das decisões tomadas (Krabuanrat & Phelps, 1998).

Para compreender a relação entre decisão e estratégia é importante saber como nasce a estratégia na empresa. Para Gavetti & Rivkin (2007) a estratégia tem natureza dual, uma vez que ela existe na mente dos gestores – suas teorias do mundo e seus locais de trabalho – e está incorporada nas atividades, normas e rotinas. A estratégia se manifesta em ambos os aspectos: primeiro na cognição e depois na ação.

O propósito prático da estratégia é fornecer um plano que emprega múltiplas entradas, opções e saídas para atingir os objetivos previstos na política da organização. Portanto, o executivo deve primeiro partir dos objetivos previstos na política da empresa, para depois desenvolver um planejamento estratégico (Davies, 2000). Isso significa que um planejamento

estratégico para melhoria da eficiência energética nos sistemas industriais depende antes: da inserção dos objetivos relativos à energia na política da empresa; de uma decisão sobre quais tecnologias utilizar e como isso pode ser feito. Neste caso, o uso e a priorização das tecnologias utilizadas na produção são determinados no nível operacional da empresa.

A gerência na empresa desempenha um papel que transcende a preocupação com custos ou com aspectos da teoria econômica tradicional na tomada de decisão para novos investimentos que busquem eficiência, segundo Augier & Teece (2009). O Gestor, fazendo uso de sua liderança, deve também levar em conta nas decisões fatores culturais e comportamentais da organização. O seu papel é de articular os objetivos de todos os setores da empresa e avaliar as oportunidades, bem como conseguir a lealdade da equipe por meio da construção da confiança.

A resposta para uma questão em uma empresa depende do interesse individual das pessoas e o alinhamento entre a questão proposta e os valores da organização. O interesse por uma determinada questão – energia, por exemplo – pode ser ativada por um processo de educação e treinamento (Zografakis *et al.*, 2008) enquanto os valores organizacionais são estratégicos (Bansal, 2003).

2.4 Análise do capítulo

O capítulo mostrou os diversos sistemas de energia utilizados nas indústrias. Também foram identificadas as diversas barreiras para uso eficiente de energia e apresentados os principais modelos e métodos na área energética. Foram discutidos fatores organizacionais importantes para serem considerados quando se elabora um modelo de energia.

Apesar da importância dos fatores técnicos apresentados, projetos na área energética, ou relativos às tecnologias de manufatura, têm sido focados na análise de custos ou retorno de investimento. Existem inúmeros fatores com grande impacto na produção que podem ser utilizados como critérios de decisão no nível operacional. Porém, as empresas normalmente têm usado somente um ou outro critério como ferramenta de decisão, como Tempo de Retorno Simples, Valor Presente Líquido ou Taxa Interna de Retorno (Lefley *et al.*, 2004; Lung *et al.*, 2005; Yang, 2010).

Ao analisar os modelos utilizados observam-se diversas lacunas, principalmente com relação às barreiras para uso eficiente de energia, o processo de intervenção e modelagem, bem como fatores organizacionais. Quando o assunto é substituição de tecnologias para

melhoria da eficiência energética, os escopos devem ser os sistemas industriais. Os modelos que focam o processo de produção usam métodos de otimização e estão preocupados com o impacto dos custos de energia, de tecnologias e materiais na produção. Nesses modelos os sistemas industriais aparecem embutidos no processo produtivo e as tecnologias e os energéticos são específicos para o setor da indústria modelado. Os modelos que focam as tecnologias e energéticos não são desenhados para trabalhar em situações em ambiente industrial complexo onde o decisor não tem conhecimento pleno da área e exige a participação dos setores da empresa. Os modelos tendem a considerar as preferências do decisor, não distinguindo as preocupações do nível operacional do nível de decisão.

No que diz respeito ao processo de intervenção do analista, os modelos apresentados não consideram fatores importantes como tempo de modelagem e a interação com o decisor. Os modelos são baseados normalmente com foco nos custos e o setor produtivo não é consultado. Quanto aos fatores organizacionais, a revisão de literatura deixa claro que o nível operacional tem valores e preocupações diferentes das preocupações do decisor. Nenhum dos modelos apresentados leva em conta esses aspectos.

Barreiras importantes para uso eficiente de energia, como incertezas e riscos para o usuário final; falta de informação sobre opções de eficiência energética; aspectos comportamentais (Fleiter *et al.*, 2011) não aparecem em nenhum dos modelos apresentados. Além disso, nenhum dos modelos deixa explícito como pode ser integrado a um sistema de gestão de energia, fundamental para a manutenção e melhoria do desempenho dos sistemas de energia.

3 O PROCESSO DE APOIO À DECISÃO MULTICRITÉRIO

Este capítulo apresenta inicialmente, na seção 3.1, um breve histórico da área de apoio à decisão; Na seção 3.2 são discutidos os conceitos sobre o processo de apoio à decisão. Na seção 3.3 são apresentadas as principais fases do processo. Na seção 3.4 é discutida a intervenção do Analista. Na seção 3.5 são mostrados os métodos multicritério de apoio à decisão. Por último, na seção 3.6, é feita uma análise do capítulo, com os principais destaques.

3.1 Histórico

Estudos militares feitos pelo exército britânico com objetivos estratégicos contra as forças alemãs, pouco antes da Segunda Guerra Mundial, deram início às atividades de apoio à decisão. A partir daí apareceram contribuições fundamentais para a programação linear, para a decisão e teoria dos jogos. Posteriormente, fortemente apoiada em modelagem matemática, é criada a Pesquisa Operacional (PO), *Operational Research* na Europa e *Operations Research* nos EUA. A PO se estendeu também para as empresas no período pós-guerra, sendo utilizada para resolver problemas de decisão em diversas áreas como a financeira, econômica e gestão empresarial (Tsoukiàs, 2008).

Inicialmente o apoio à decisão baseava-se em elementos objetivos e métodos do tipo mono-critério. Com as importantes contribuições de Simon (1955) e também da área da ciência cognitiva, o apoio à decisão passou por transformações até o aparecimento das subjetivas técnicas de estruturação de problemas (Mingers & Rosenhead, 2004). A partir das décadas de 1960 apareceram os métodos multicritério, como os métodos de sobreclassificação propostos por Roy (1996) e o método baseado na Teoria da Utilidade Multiatributo proposto por Keeney & Raiffa (1976). Outros métodos de apoio à decisão multicritério têm aparecido na literatura desde então.

3.2 Conceitos

O apoio à decisão pode ser definido como a atividade que auxilia na obtenção de respostas colocadas pelos atores envolvidos no processo de tomada de decisão (Roy, 1996). Os **Atores** do processo de decisão são as pessoas que, baseadas em seus valores, desejos, interesses e preferências participam do processo decisório. Existem diferentes tipos de atores, e a distinção entre eles é em relação às funções que estes desempenham no processo decisório

e também pelo poder de influenciar a tomada de decisão. O **Analista** é a pessoa que tem o conhecimento necessário sobre a área de apoio à decisão para auxiliar no processo. O **Decisor** é um ator, podendo ser uma ou mais pessoas, com poder de decisão. É ele quem avalia as possibilidades e os objetivos, e expressa suas preferências impondo-as durante o processo, não excluindo logicamente a opinião de outros atores, conforme enfatiza Roy (1996).

De um modo geral, o termo ‘apoio à decisão’ refere-se à abordagem que procura fornecer um conhecimento especializado para direcionar decisões específicas. Para Tsoukiàs (2007, p.7), que considera o par cliente-analista como um só *stakeholder*, o processo de apoio à decisão representa o esforço cognitivo feito por esse par, com o objetivo de influenciar positivamente o processo de decisão no qual estão envolvidos.

O apoio à decisão multicritério proporciona ao decisor algumas ferramentas que permitem resolver problemas considerando diferentes pontos de vista, muitas vezes contraditórios (Vincke, 1992). O processo para tomada de decisão requer procedimentos e ferramentas para auxiliar os participantes na busca de alternativas com o objetivo de encontrar soluções aceitáveis diante de conflitos.

Uma ação ‘a’ é uma representação de uma possível contribuição para a decisão global, enquanto uma ação potencial é aquela temporariamente julgada realista pelos atores (Roy, 1996). Quanto às problemáticas elas são classificadas como:

- **Escolha** – A partir de um conjunto de ações A seleciona um conjunto restrito A' .
- **Classificação** – Classifica as ações de acordo com o valor das categorias Classe 1, 2...
- **Ordenação** – Faz um *ranking* das ações em ordem decrescente de preferências.
- **Descrição** – Descreve as ações e suas consequências de modo formal e sistemático.

3.3 Fases do processo decisório

O processo de decisão, segundo a literatura, é dividido em fases e, em cada uma delas um ou mais métodos podem ser empregados. Em Bana e Costa *et al.* (1999) o processo de apoio à decisão inicia pela estruturação do problema e na sequência a avaliação e a criação de direções para as ações. Belton & Stewart (2002) destacam as seguintes fases do processo de apoio à decisão: identificação e estruturação do problema, modelagem, análise e desenvolvimento de plano de ação. Tsoukiàs (2007) divide o processo de apoio à decisão de acordo com as seguintes fases: representação da situação do problema, formulação do problema, avaliação do modelo e recomendação final, conforme descrito a seguir.

A fase de representação da situação do problema é um esforço para identificar: quem tem o problema; o motivo do problema; quem decide sobre o problema; qual o compromisso do cliente com o problema; quem sofrerá as consequências da decisão. Essa fase tem o objetivo de situar tanto o papel do cliente como do analista no processo de decisão.

Na fase de formulação do problema as preocupações dos atores são transformadas em problemas formais. Nesta fase podem ser utilizados métodos específicos de estruturação de problema. Os métodos de estruturação de problemas se justificam quando existem: múltiplos atores; múltiplas perspectivas; conflitos de interesses; aspectos intangíveis importantes; incertezas chaves (Mingers & Rosenhead, 2004).

Na fase de construção e avaliação do modelo de decisão o analista processa as informações com a utilização de método formal de decisão. Considerando a modelagem multicritério, nesta fase são identificados os critérios e os demais parâmetros junto ao decisor. O analista deve estabelecer o conjunto de propriedades que o método deve cumprir, considerando as propriedades peculiares a cada um.

Antes de fazer a recomendação ao decisor, o analista deve fazer uma análise para verificar a consistência do modelo. Uma análise de sensibilidade pode ser realizada para verificar o grau de variação da solução com a variação dos parâmetros utilizados. A recomendação final deve traduzir a linguagem formal da decisão para a linguagem corrente do decisor.

3.4 Intervenção do Analista

3.4.1 O Analista e o Cliente

O acesso inicial do Analista à empresa é pouco discutido na literatura, mas pode depender de uma estratégia de rede de relacionamento com as organizações, segundo Mingers & Rosenhead (2004). Para Tsoukias (2007), o apoio à decisão ocorre da interação de pelo menos dois atores: o Analista e o Cliente, que pode ou não ser o decisor. O processo de intervenção, portanto, é feito por um analista, que possui o conhecimento metodológico e, junto com o cliente (e outros atores), procura resolver o problema de decisão.

O Cliente é um ator importante, uma vez que normalmente é ele quem requer o estudo e é o responsável pela alocação dos recursos necessários com intuito de realizar o trabalho. Utilizando seus contatos na empresa ele auxilia o analista a obter informações sobre a

empresa e sobre o problema a ser estudado. Essas informações são cruciais para que o analista faça uma abordagem correta do problema (Roy, 1996).

3.4.2 O Analista e o Decisor

Um estudo conduzido por Bond, Carlson & Keeney (2008) mostra que um modelo de decisão pode omitir objetivos importantes devido à dificuldade do decisor em articular o que ele quer. O analista tem um papel relevante, que pode atuar com outros atores para a definição de objetivos estratégicos para a organização.

Segundo Keeney (2004), se não forem tomadas boas decisões, objetivos importantes poderão não ser atingidos nas organizações. A tomada de decisão é uma habilidade complexa que pode ser adquirida e a área especializada em decisão está equipada para fazer esse treinamento, segundo o Autor. Esse treinamento exige uma nova forma de pensar, pautada em uma sólida fundamentação teórica na área de decisão. O analista tem a função de interagir com o decisor – e outros atores – com esse objetivo.

3.4.3 O Analista e os *Stakeholders*

Os *stakeholders* são atores do processo de decisão que, tendo interesse na decisão, intervêm no processo tentando empurrar a decisão em uma direção desejada, de acordo com seus sistemas de valores (Roy, 1996). O analista tem o papel de conduzir o processo de construção do modelo, integrando os diversos pontos de vista dos participantes (Bana e Costa *et al.*, 1999).

Uma questão importante com que o analista pode se deparar é a necessidade de conhecimento especializado em certas situações. No trabalho sobre turbinas eólicas para geração de energia, por exemplo, os autores Alberts *et al.* (2007) concluem que é mais produtivo, inicialmente consultar especialistas da área técnica, para depois buscar o consenso entre os *stakeholders*. A experiência técnica é um fator crítico para o sucesso ou falha em um processo de decisão, segundo os autores. Isso mostra que, em assuntos técnicos e complexos, como é o caso do uso de energia, apenas a opinião dos *stakeholders* pode não ser o bastante.

Existem diferentes abordagens do processo de apoio à decisão (Dias & Tsoukiàs, 2004; Tsoukiàs, 2007): normativa, descritiva, prescritiva e construtiva. O entendimento das abordagens é importante, pois elas divergem quanto ao modelo de preferências do decisor e também no modo de obtenção desse modelo, implicando em diferente postura do analista no processo de decisão.

Segundo a abordagem normativa, o processo de obtenção do modelo é por meio de postulado, partindo do pressuposto que o comportamento do decisor é do tipo racional. Esses modelos são universais, ou seja, são aplicados a todos que tenham um comportamento racional. Desvios dessas normas são considerados erros por parte do decisor, que deve ser auxiliado a pensar do modo racional.

A abordagem descritiva utiliza o processo de obtenção do modelo a partir da observação de como o decisor toma as decisões. Esses modelos também são de aplicação geral. A diferença é que na abordagem normativa o modelo racional deriva de normas definidas a priori enquanto os modelos da abordagem descritiva são baseados em comportamentos empíricos.

Se o analista atuar junto ao decisor para fazer a educação do sistema de preferências para uma aplicação específica, então a abordagem é prescritiva. Neste caso, o modelo retrata o comportamento e os valores de um determinado decisor para uma situação específica, em certo contexto. Nesse tipo de abordagem o decisor pode ter dificuldade de expressar suas preferências e seus valores ao analista e a escolha do método adequado é fundamental.

Caso o analista atue junto ao decisor e/ou *stakeholders* no sentido de aprenderem juntos sobre a situação problemática e construir em conjunto, de forma consensual, o modelo de preferências, então a abordagem é construtiva. Neste caso, o processo de decisão envolve sucessivos debates entre o analista o decisor e outros atores. Na abordagem construtiva as ações podem ser vistas como fragmentos e a decisão final é a síntese dessa rede de decisões interconectadas obtidas durante o processo de decisão, que pode ser influenciado pela atuação do analista (Roy, 1996). Nesse tipo de abordagem o modelo não é genérico, valendo apenas para um decisor em dado problema e em certa circunstância.

3.5 Métodos multicritério

Os métodos multicritério, descritos na sequência, podem ser classificados de diversos modos. Neste trabalho é considerada a classificação dos métodos com base no tipo de abordagem (Roy, 1996), conforme segue:

- **Critério único de síntese** – Diferentes pontos de vistas são reunidos dentro de uma única função de síntese, em um modelo aditivo. É aplicável quando os critérios são do tipo compensatório. Exemplos: MAUT e AHP (apresentados na sequência).

- **Abordagem outranking** – As ações são comparadas par a par, com a identificação das preferências de uma ação em relação à outra e agregando-se as preferências, com o objetivo de resolver o problema de decisão. É aplicável quando os critérios não são compensatórios. Exemplos: PROMETHEE e ELECTRE (descritos na sequência).
- **Métodos interativos** – Emprega a interatividade para descobrir as opções e atingir os objetivos ou aspirações do decisor.

No contexto de energia, especificamente quanto ao seu fornecimento, inclusive energia alternativa, os métodos de avaliação multicritério, segundo a literatura, têm sido utilizados para: avaliar opções de suprimento de gás natural (Afgan *et al.*, 2008); avaliar os produtores de energias renováveis na União Européia (Patlitzianas *et al.*, 2007); combinar opções de sistemas de potência e calor (Pilavachia *et al.*, 2006).

A aplicação de mais de um método em um mesmo processo decisório tem aparecido com certa frequência na literatura (Bana e Costa *et al.*, 1999; Brito *et al.*, 2010; Konidari & Mavrakis, 2007; Ülengin *et al.*, 2010). Existem três argumentos principais para uso de multimetodologia apontados por Mingers (2001): primeiramente, os problemas reais são multidimensionais; em segundo lugar, a intervenção não é uma tarefa simples, um evento discreto, mas um processo que se desenvolve em diversas fases e exige diversas ações; por último, a combinação de diferentes métodos pode oferecer novos *insights* e dar maior confiabilidade ao resultado.

Na sequência são apresentados os principais métodos multicritério. Os métodos utilizados especificamente em sistemas industriais de energia do setor industrial de transformação e manufatura são apresentados no capítulo 4.

3.5.1 MAUT

O MAUT – *Multi-Attribute Utility Theory* – classificado como critério único de síntese, foi proposto por Keeney & Raiffa (1976) e derivou da teoria da utilidade. Enquanto teoria, a determinação da função está associada à estrutura axiomática e às preferências do decisor. Uma função valor está associada a uma escala ordinal na avaliação das consequências, enquanto uma função utilidade está associada a uma escala cardinal de diferenças. Um dos principais conceitos da utilidade multiatributo está relacionado à independência. Esta propriedade permite simplificar a determinação da função utilidade. Um atributo é

independente de outro em utilidade quando as preferências condicionais para loterias no primeiro atributo não dependem de um nível particular z (Gomes *et al.*, 2006). O método é aplicável quando os atributos são do tipo compensatório (*trade-off*), em situações em que a desvantagem de um critério seja compensada pela vantagem em outro critério (Vincke, 1992).

O método tem sido aplicado em projetos e planejamento energético e ambiental (Pohekar & Ramachandran, 2004). Em função das limitações das ferramentas de modelagem econômica convencionais, como custo-benefício, o MAUT, juntamente com outras ferramentas de programação matemática, foi utilizado para selecionar alternativas na área de políticas energéticas e ambientais nos EUA (Greening & Bernow, 2004). No trabalho, procura-se assegurar a robustez do processo de decisão pelo uso de mais de uma ferramenta para permitir aos usuários uma reflexão sobre os valores de julgamento e escolhas. No planejamento energético de um bairro com residências e indústrias, o método também foi aplicado, tratando as incertezas pela análise de três cenários (baixo, médio e alto) relativos aos preços da eletricidade (Loken, 2007).

A função utilidade é obtida por meio de um protocolo estruturado e fundamentado na estrutura axiomática da teoria da utilidade. Isso dá ao método uma consistência maior em relação a outros métodos do gênero. Por meio da “*elicitação*” ou “*educação*”, o decisor especifica parâmetros ou condições que influenciam o processo de decisão. A função utilidade pode ser obtida por meio da educação direta, a partir de perguntas feitas pelo analista sobre suas preferências e é indicado para problemas com poucas consequências (Gomes *et al.*, 2006). O processo é feito em cinco partes (Keeney, 1977):

- (1) Familiarizar o decisor com a terminologia e motivar para o processo;
- (2) Verificar a independência com relação às preferências;
- (3) Acessar os *trade-offs* entre os atributos;
- (4) Acessar os atributos individuais da função utilidade;
- (5) Verificar a consistência e fazer a verificação

Outro modo para o levantamento da função utilidade é por meio de um procedimento matemático, como o método UTA (*Utilités Additives*) desenvolvido por Jacquet-Lagrèze & Siskos (1982), que permite a determinação da utilidade de qualquer consequência em um intervalo predefinido. O método tem outras variações, como o UTADIS, que foi concebido para tratar da problemática de classificação e o método UTASTAR que considera ações

previamente ordenadas de acordo com as preferências do decisor (Siskos & Yannacopoulos, 1985; Siskos *et al.*, 2005). O UTASTAR é desenvolvido em quatro etapas:

- I) Expressa os valores globais de ações de referências $u[g(a_k)]$, $k=1,2,\dots,m$, primeiro em termos de valores marginais $u_i(g_i)$ e depois em termos de variáveis w_{ij} ;
- II) Introduz dois erros, um superestimado e outro subestimado, fazendo a diferença de duas ações consecutivas;
- III) Resolve uma programação linear para minimizar os erros;
- IV) Testa a existência de outras soluções próximas, maximizando a utilidade.

O MAUT está fundamentado em seis axiomas (Gomes *et al.*, 2006):

- Ordenabilidade – Dadas as consequências A e B , então A pode ser preferível a B , ou B preferível a A ou ambas podem ser indiferentes.
- Transitividade – Se A é preferível a B e B é preferível a C , então A é preferível a C .
- Continuidade – Se A é preferível a B e B é preferível a C , então existe p entre $0 < p < 1$, tal que B seja indiferente a $[A, p; C, 1-p]$.
- Substitutabilidade – Se A é indiferente a B , então $[A, p; C, 1-p]$ também é indiferente a $[B, p; C, 1-p]$.
- Redutibilidade – $\{[A, p; B, 1-p], q; B, 1-q\}$ é indiferente a $[A, pq; B, 1-pq]$.
- Monotonicidade – Se A é preferível a B , então $[A, p; B, 1-p]$ também é preferível a $[A, q; B, 1-q]$. Se a preferência em utilidade aumenta quando o valor aumenta, então a função é ‘monotônica crescente’, ao contrário, é ‘monotônica decrescente’.

Dois conceitos são importantes: a independência em preferência e a independência em utilidade. A independência em preferência é equivalente a aceitar *trade-off* entre os atributos. A independência em utilidade é outro conceito importante, principalmente em situações que envolvem risco. Um atributo Y é considerado independente em utilidade de um atributo Z quando as preferências condicionais para loterias em Y não dependem do valor de z . Um atributo Z é independente de um atributo Y quando as preferências condicionais para loterias em Z não dependem do valor de y . No caso de função utilidade aditiva, não é desejável que uma quantidade de um atributo dependa de certa quantidade de outro atributo (Gomes *et al.*, 2006). O UTASTAR apresenta bons resultados, mesmo com critérios interdependentes (Beuthe & Scannella, 2001).

3.5.2 PROMETHEE

Os métodos da família PROMETHEE – *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations* – foram propostos em 1982 por Brans e Mareschal da *Free University of Brussels* e são compostos atualmente por:

- PROMETHEE I – faz um *ranking* parcial das alternativas;
- PROMETHEE II – faz um *ranking* completo das alternativas;
- PROMETHEE III – faz um *ranking* baseado em intervalos;
- PROMETHEE IV – faz um *ranking* parcial ou completo para soluções contínuas;
- PROMETHEE VI – quando o decisor não está apto ou não quer definir pesos;
- PROMETHEE GDSS – aplicado a decisões em grupo;
- PROMETHEE TRI – indicado para problemas de alocação;
- PROMETHEE Cluster – usado para classificação nominal.

Os métodos da família PROMETHEE têm sido utilizados em diversas áreas, tais como: social, energética, meio ambiente, hidrologia, financeira, química, manufatura, logística e transporte (Behzadian *et al.*, 2010). Pohekar & Ramachandran (2004) destacam o uso do método PROMETHEE II em projetos e análise de impactos de energias alternativas. Na área energética, os seguintes trabalhos têm sido publicados em periódicos indexados:

- Com o objetivo de fazer um *ranking* dos cenários para a expansão do sistema elétrico na Grécia é utilizando o método PROMETHEE II (Diakoulaki & Karangelis, 2007). Os autores escolheram o PROMETHEE pela simplicidade e capacidade de aproximar o modo de expressar da mente humana para sintetizar as preferências, diante das múltiplas e contraditórias perspectivas de decisão. A robustez dos resultados é verificada pela análise de sensibilidade.
- Com o objetivo de priorizar tecnologias sustentáveis para a geração de eletricidade na Grécia, o método PROMETHEE II foi escolhido, pela simplicidade do uso e baixa complexidade (Doukas *et al.*, 2006). As incertezas são tratadas pela definição de cenários pessimistas, otimistas e instáveis para o planejamento energético.

- O método PROMETHEE II é utilizado para fazer um ranking de alternativas de projetos de energia renováveis, com análise de sensibilidade para medir divergências entre as preferências dos *stakeholders* (Haralambopoulos & Polatidis, 2003).
- Um estudo de caso para avaliação de cenários de energias renováveis ilustra a incorporação de incertezas no método PROMETHEE (Hyde *et al.*, 2003). As incertezas são tratadas utilizando distribuição de probabilidades. A probabilidade de que as alternativas são ordenadas, baseada em todos os critérios prováveis dos parâmetros de entrada, está disponível para que o decisor analise a robustez da solução.
- O método PROMETHEE foi utilizado para avaliar alternativas para novos sistemas de geração de energia na Tailândia, abordando aspectos tecnológicos, impactos ambientais, fatores econômicos e direções estratégicas (Tzeng *et al.*, 1992).

No PROMETHEE o decisor deve expressar suas preferências entre ações e a importância dos critérios em forma de escala de razão. Outro ponto é que os métodos tipo *outranking*, podem ter a solução final alterada com a adição ou eliminação de uma alternativa (Keyser & Peeters, 1996). Entretanto, Mareschal *et al.* (2008) afirmam que esse fenômeno ocorre somente em condições específicas e entre posições adjacentes.

Os autores do método desenvolveram também a ferramenta GAIA – *Geometrical Analysis for Interactive Assistance* – que permite a análise gráfica da relação entre os critérios e das alternativas. A ideia do plano GAIA é reduzir os problemas multidimensionais a duas dimensões apenas para análise. Boa parte dos trabalhos que usam o PROMETHEE foca o plano GAIA como análise (Behzadian *et al.*, 2010). Por exemplo, em um trabalho na área de energia térmica e solar usando os métodos PROMETHEE I e II, os aspectos de robustez são tratados utilizando a análise GAIA, que permite a análise gráfica dos conflitos. Em um estudo, essa análise foi usada no lugar da tradicional análise de custo-benefício e outros indicadores econômicos e financeiros (Cavallaro, 2009).

Os métodos seguem o princípio de *outranking* e são baseados em uma relação binária entre as ações, onde o desvio (d) é a diferença entre os valores das duas ações. A função de preferência (P) é definida como uma função do desvio, podendo ser de seis tipos, conforme a Figura 3.1. O parâmetro (q) indica o limiar de indiferença, (p) o limiar de preferência e (s) um valor intermediário entre (q) e (p).

Critério	Função	Definição	Parâmetros
Usual		$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ 1 & d > 0 \end{cases}$	—
U-Shape		$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ 1 & d > q \end{cases}$	q
V-Shape		$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ \frac{d}{p} & 0 \leq d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$	p
Nível		$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ \frac{1}{2} & q < d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$	p, q
V-Shape com indiferença		$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq q \\ \frac{d-q}{p-q} & q < d \leq p \\ 1 & d > p \end{cases}$	p, q
Gaussiano		$P(d) = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ 1 - e^{-\frac{d^2}{2s^2}} & d > 0 \end{cases}$	s

Figura 3.1 – Tipos de funções de preferência (Brans & Marechal, 2005)

3.5.3 Outros métodos aplicados na área energética

Além dos métodos citados nos itens 3.5.1 e 3.5.2, existem outros com diversas aplicações. Os métodos ELECTRE – *Elimination and Choice Translating Algorithm* – foram desenvolvidos por Roy (1996) e associados, no laboratório de análise e modelagem de sistemas de apoio à decisão, Universidade de Paris, *Dauphine*, propostos para problemas cujo conjunto de alternativas é finito, mas sua filosofia é válida para conjuntos infinitos. A ideia de

pesos é usada para quantificar a importância relativa dos critérios e são baseados em dois índices: de concordância, que mede o valor do apoio dado pela informação e, de discordância, que mede o poder da evidência contrária à concordância. Os métodos ELECTRE têm sido aplicados para diversos propósitos na área de energia, conforme segue:

- Pohekar & Ramachandran (2004) citam o uso do método em diversas aplicações na área energética, como seleção de energias alternativas, plantas térmicas e transporte de energia. Os autores destacam que, em planejamento energético, o ELECTRE III é amplamente utilizado.
- Com o objetivo de difusão de tecnologias de energias renováveis (energia solar, eólica, biomassa, hidráulica) em escala regional, o método ELECTRE III, na Itália, é aplicado a um plano de ação (Beccali *et al.*, 2003). Neste caso a análise de sensibilidade é utilizada para identificar as soluções mais robustas, que são menos influenciadas pelos pesos atribuídos aos critérios.
- Na Grécia, o método ELECTRE III é utilizado para definir alternativas estratégicas para geração de energia, em face do crescimento da demanda, das necessidades de novas tecnologias, dos conflitos de interesses da comunidade e do perfil geográfico e socioeconômico da região (Georgopoulou *et al.*, 1997). A robustez é tratada como análise de sensibilidade no final do modelo.

O AHP – *Analytical Hierarchy Process* – proposto por Saaty (1980) também é do tipo critério único de síntese, baseado na hierarquização de todos os critérios. No topo da hierarquia está o objetivo, depois os critérios e abaixo as alternativas. É feita uma comparação par a par em cada nível, considerando os objetivos, os critérios e as alternativas. As principais críticas ao método são com relação à escala, à falta de transitividade e por não ser tão bem fundamentado como o MAUT (Belton & Goodwin, 1996).

Pohekar & Ramachandran (2004) destacam o AHP como um método muito popular e amplamente aplicado em planejamento energético. É um método bastante utilizado no mundo, abrangendo as áreas: social, ecológica, biológica, econômica, agrícola, inclusive a energética, segundo Wang *et al.* (2009). Na Jordânia é usado para priorizar instrumentos políticos para eficiência energética (Kablan, 2004). Na Índia, o método é utilizado para priorizar barreiras para a eficiência energética em *cluster* de pequenas e médias indústrias (Nagesha & Balachandra, 2006).

O método de otimização multi-objetivo tem sido aplicado na área de planejamento de energias renováveis (Borges & Antunes, 2003). O método multicritério *Analysis and Synthesis of Parameters under Information Deficiency (ASPID)*, que incorpora elementos fuzzy, é usado pelos autores Pilavachi *et al.* (2006) para avaliar opções de geração de energia, como turbinas a gás, máquinas a diesel, etc.

3.6 Análise do capítulo

O capítulo apresentou um breve histórico da PO, alguns conceitos de apoio à decisão e os principais elementos do processo de decisão – fases, intervenção do analista e métodos multicritério. Os procedimentos e as ferramentas utilizadas no processo de decisão auxiliam os participantes na busca de alternativas com o objetivo de encontrar soluções aceitáveis em situações de conflitos.

A intervenção do analista no processo de apoio à decisão é feita junto aos atores do processo. Cabe ao analista a tarefa de compreender as preocupações dos atores, a articulação entre os setores da empresa, a escolha do método e da abordagem apropriada, bem como a análise dos resultados antes da recomendação ao decisor. Caso haja necessidade de conhecimento especializado em energia, o analista pode recorrer a um profissional da área.

Na fase de construção do modelo multicritério são identificados os critérios e os demais parâmetros antes da aplicação de um método multicritério. Os métodos de apoio à decisão multicritério do tipo *outranking* (ELECTRE e PROMETHEE) têm sido utilizados em diversas áreas, inclusive na área energética. Com relação aos métodos aditivos, o AHP tem tido ampla utilização dada à facilidade de aplicação, embora o método seja bastante criticado na literatura, e o MAUT tem sido menos aplicado devido à sua complexidade. O método UTASTAR é utilizado para determinação da utilidade e é aplicado a partir das seguintes condições: ordenação prévia de ações; intervalo de valores com níveis que variam do pior para o melhor nível de preferência do decisor; observação aos princípios da utilidade multiatributo, como a monotonicidade e independência aditiva, por exemplo. Antes da recomendação ao decisor, uma análise de sensibilidade pode ser feita para verificar o comportamento da solução a partir de variações nos parâmetros estabelecidos. A ferramenta GAIA permite a análise gráfica da relação entre os critérios e as alternativas.

4 MODELO PROPOSTO PARA SUBSTITUIÇÃO DE TECNOLOGIAS EM SISTEMAS INDUSTRIAIS DE ENERGIA

A comparação entre o processo de apoio à decisão multicritério e a modelagem energética em sistemas industriais de energia é importante para a compreensão das principais semelhanças e diferenças entre ambos (seção 4.1), com o objetivo de fornecer os fundamentos do modelo energético (seção 4.2). O modelo pode ser aplicado em duas situações: na situação I, com a ordenação completa das tecnologias a serem substituídas (seção 4.3); na situação II, para seleção de portfólios de opções a partir da ordenação (seção 4.4).

4.1 Processo de modelagem multicritério e Modelagem de decisão energética

Para o apoio à decisão multicritério, o processo de decisão tem uma estruturação formal, que é encontrada na literatura. Os elementos fundamentais do processo de decisão na área energética não são apresentados de forma estruturada, mas encontram-se dispersos na literatura. A estruturação do processo de decisão na área energética apresentada no Capítulo 2 facilita a comparação dos seus elementos com os elementos do processo de decisão. Essa comparação permite evidenciar lacunas no processo de modelagem energética e inserir outros elementos do processo de decisão multicritério.

Uma análise dos capítulos 2 e 3 mostra que ambos os processos, o de decisão multicritério e o processo de modelagem energética ambos são desenvolvidos em fases e exigem a presença de um especialista e uma metodologia formal para a solução do problema e devem ser apresentados na linguagem usual do decisor. Entretanto, existem algumas diferenças identificadas a partir da revisão de literatura quanto à abordagem do especialista, com relação às ferramentas e a modelagem, que são discutidas a seguir.

4.1.1 A abordagem do especialista

No processo de decisão o especialista é o Analista, que exerce um papel importante, interagindo com os atores envolvidos, no sentido de auxiliar na modelagem do problema de decisão. No caso da modelagem energética, o especialista em energia normalmente é um Engenheiro, responsável pelo planejamento e condução dos trabalhos. Ambas as especialidades, decisão e energia, são fundamentais no modelo energético.

Com relação à abordagem do analista no processo de decisão, existem opções, como a abordagem construtiva, a prescritiva, etc., e o foco são os atores. Na modelagem energética, o especialista atua diretamente na planta industrial, com foco nos sistemas industriais, utilizando princípios de engenharia para levantamento dos dados por meio de auditoria energética. A abordagem baseada no princípio *bottom-up* é importante para fazer a caracterização das tecnologias, enquanto as abordagens construtiva e prescritiva são fundamentais para a identificação das preferências dos atores do processo de decisão.

4.1.2 As ferramentas de decisão

No processo de apoio à decisão multicritério diversos métodos têm sido propostos. O uso de energia no sistema produtivo envolve muitos critérios, alguns deles relevantes para o nível operacional e outros para o nível gerencial. Em alguns casos, apesar dos múltiplos critérios, normalmente um ou outro critério financeiro relevante para o nível gerencial – como tempo de retorno de investimento ou valor presente líquido – tem sido utilizado pelas empresas como ferramenta de decisão em projetos para melhoria da eficiência energética. Neste caso, esses critérios de decisão são apresentados ao decisor por meio de um estudo de viabilidade, técnica e econômica, feito pelo especialista em energia. A metodologia multicritério ainda é pouco explorada em modelos de decisão de sistemas industriais de energia.

4.1.3 A modelagem

No processo de decisão a modelagem é feita baseada nas preferências do decisor, levando-se em conta os interesses de outros atores. A modelagem energética em uma planta industrial é baseada no princípio *bottom-up* com o objetivo de levantamento dos dados dos sistemas industriais de energia. Um estudo de viabilidade econômica é feito, considerando critérios financeiros normalmente utilizados por empresas.

O problema central é que a modelagem baseada apenas no princípio *bottom-up*, que é focado na caracterização das tecnologias, não considera as barreiras para eficiência energética, como: incertezas e riscos para a produção; falta e assimetria de informações sobre opções de eficiência energética; orçamento, aspectos comportamentais da empresa, etc. É fundamental que todos esses aspectos sejam levados em conta na construção do modelo, tanto as necessidades do nível operacional como as preferências do decisor.

4.2 Fundamentos do modelo proposto

Considerando a necessidade de caracterizar as opções tecnológicas e o uso eficiente de energia, o modelo proposto segue o princípio *bottom-up* para levantamento de dados por meio de auditoria energética e, também, incorpora barreiras organizacionais para o uso eficiente de energia. Com relação ao processo decisório, o modelo incorpora diversos elementos da área de decisão, quanto à abordagem, métodos e também considera alguns princípios para sua aplicação, conforme segue.

4.2.1 Abordagens e métodos

Tanto a abordagem quanto os métodos de apoio à decisão no processo de modelagem dependem de diversos fatores. Segundo Gomes *et al.* (2006), a escolha de um método multicritério depende das características do problema analisado, do contexto considerado, da estrutura de preferências do decisor e da problemática. Os atores têm suas preocupações, seus conhecimentos e seus próprios valores que precisam ser levados em conta no processo de modelagem. Desse modo, há que se fazer distinção dos níveis nos quais o modelo é aplicado: o nível operacional e o nível de decisão. A abordagem do analista é diferente para cada nível.

Os sistemas industriais de energia são compostos por tecnologias que possuem diferentes níveis de desgastes, de eficiência energética e graus de impacto no processo produtivo. Portanto, no nível operacional é importante conhecer as prioridades para a substituição das tecnologias, que são estabelecidas pela problemática da ordenação.

Algumas barreiras organizacionais, como assimetria de informação, por exemplo, dependem de uma forte interação entre as áreas da organização. O nível operacional envolve vários setores, com diversos pontos de vista que devem ser considerados por meio de consenso. Uma abordagem construtiva é indicada, neste caso. É possível que algumas ações sejam difíceis de serem comparadas, portanto, um método de sobreclassificação (*outranking*) é recomendável. A principal vantagem dos métodos de relações binárias de sobreclassificação, de acordo com Barberis (2006), é que as preferências não são necessariamente transitivas e alguns pares de alternativas podem ser incomparáveis. Os critérios são do tipo não compensatório, uma vez a estrutura de preferências é caracterizada pelos interesses de vários setores, o que justifica o método de sobreclassificação. Não é possível, por exemplo, compensar um critério relacionado à confiabilidade com outro critério.

No nível gerencial, o decisor está interessado nas consequências da decisão. A teoria da utilidade fornece o embasamento que permite a avaliação das consequências de uma decisão por meio do processo de educação de preferências, que tem como objetivo incorporar as escolhas do decisor e sua postura frente ao problema de decisão. Esse processo permite a criação de uma escala que estabelece um valor de utilidade a cada consequência. Como a utilidade é definida como a propriedade de um bem de produzir benefício ou vantagem (Gomes *et al.*, 2006), a sua identificação junto ao decisor contribui para selecionar a opção mais vantajosa, aumentando as possibilidades de substituição das tecnologias.

O analista precisa captar a percepção do decisor sobre os critérios de preferência com o objetivo de resolver o problema de decisão. Neste caso a abordagem apropriada é a prescritiva e o decisor é considerado com perfil de aversão ao risco. O método indicado é de função única de síntese, uma vez que os critérios possuem lógica compensatória. Por exemplo, é possível que o decisor opte por um tempo de retorno maior, desde que haja maior redução no consumo de energia. É recomendado o método MAUT, devido à sua sólida estrutura axiomática. O método, que derivou da Teoria da Utilidade, é indicado para o desenvolvimento de modelos em problemas complexos com *trade-off* entre atributos. A partir da definição dos atributos (critérios), o analista identifica os valores limites (nível pior – nível melhor) para cada atributo junto ao decisor. Para a determinação das utilidades do decisor é utilizado o método UTASTAR, conforme descrito na seção 5.4.2.

Cada processo industrial exige um tipo de tecnologia, com consumo e eficiências diferentes; impactos distintos na produção; diversos fornecedores e preços. Existem diversos portfólios de opções que podem ser avaliados para a decisão final. Outro ponto a ser destacado é que a determinação da utilidade não é o bastante, uma vez que a solução final consiste em maximizar o valor esperado da função utilidade. O objetivo é encontrar o portfólio com o *mix* de ações que maximize a utilidade do decisor.

4.2.2 Situações e princípios para aplicação do modelo

O modelo proposto é aplicável à substituição de tecnologias de qualquer sistema industrial de energia, em duas situações. Na **situação I** (seção 4.3) a empresa pode estar interessada apenas em priorizar as tecnologias a serem substituídas. Neste caso é feita uma ordenação completa das tecnologias utilizando um método de abordagem *outranking* (PROMETHEE ou ELECTRE). A empresa pode substituir paulatinamente as tecnologias, de

acordo com suas necessidades e condições financeiras, com base em uma referência de mercado. Na **situação II** (seção 4.4) é possível que a empresa se depare com diversas opções de mercado, em termos de fornecedores, preços, eficiências, etc. Neste caso convém que a empresa trabalhe com um conjunto restrito de tecnologias, mas com vários portfólios de opções, com a finalidade de selecionar o melhor, baseado nas utilidades do decisor, usando a Teoria da Utilidade Multiatributo, além de observar a restrição orçamentária da empresa.

A aplicação do modelo está baseada nos seguintes princípios:

- Comprometimento – A Alta Gerência, a média gerência e os funcionários devem estar comprometidos para a realização do trabalho na empresa.
- Multidisciplinaridade – O sistema de produção envolve especialidades de outras áreas do conhecimento, como energia, engenharia, manutenção, produção, financeira, recursos humanos e decisão.
- Ampla participação – Como consequência do princípio anterior, é imprescindível a participação de todos os setores envolvidos no processo de decisão.
- Intervenção pouco invasiva – Em função do foco na produção, da exiguidade de tempo e de mão de obra no setor industrial, é recomendável que o processo de modelagem seja feito por um agente externo e que seja menos invasivo possível, de modo a não prejudicar a produção.
- Acurácia – A confiabilidade dos resultados é vital para a aceitação das soluções. Medições da área energética seguindo os princípios de engenharia, cálculos financeiros, bem como métodos de apoio à decisão, devem ter bom nível de precisão.

4.3 Situação I – ordenação das tecnologias

Na indústria, o primeiro contato ocorre entre o analista e o cliente, que pode ser o decisor ou não. Primeiramente o analista identifica o decisor e todos os atores junto aos setores envolvidos – gestão, financeiro, engenharia, produção, operação e manutenção. Em seguida o analista conduz o trabalho para conhecer as preocupações e os interesses dos atores envolvidos.

A informação sobre os parâmetros é crucial no processo de decisão e engloba duas etapas: Dados técnicos e financeiros e Modelagem. Cabe destacar que o decisor normalmente

não tem conhecimento suficiente do nível operacional para a definição dos parâmetros, que deve ser feita pelos setores da empresa. O processo de decisão está descrito no esquema da Figura 4.1 e discutido na sequência.

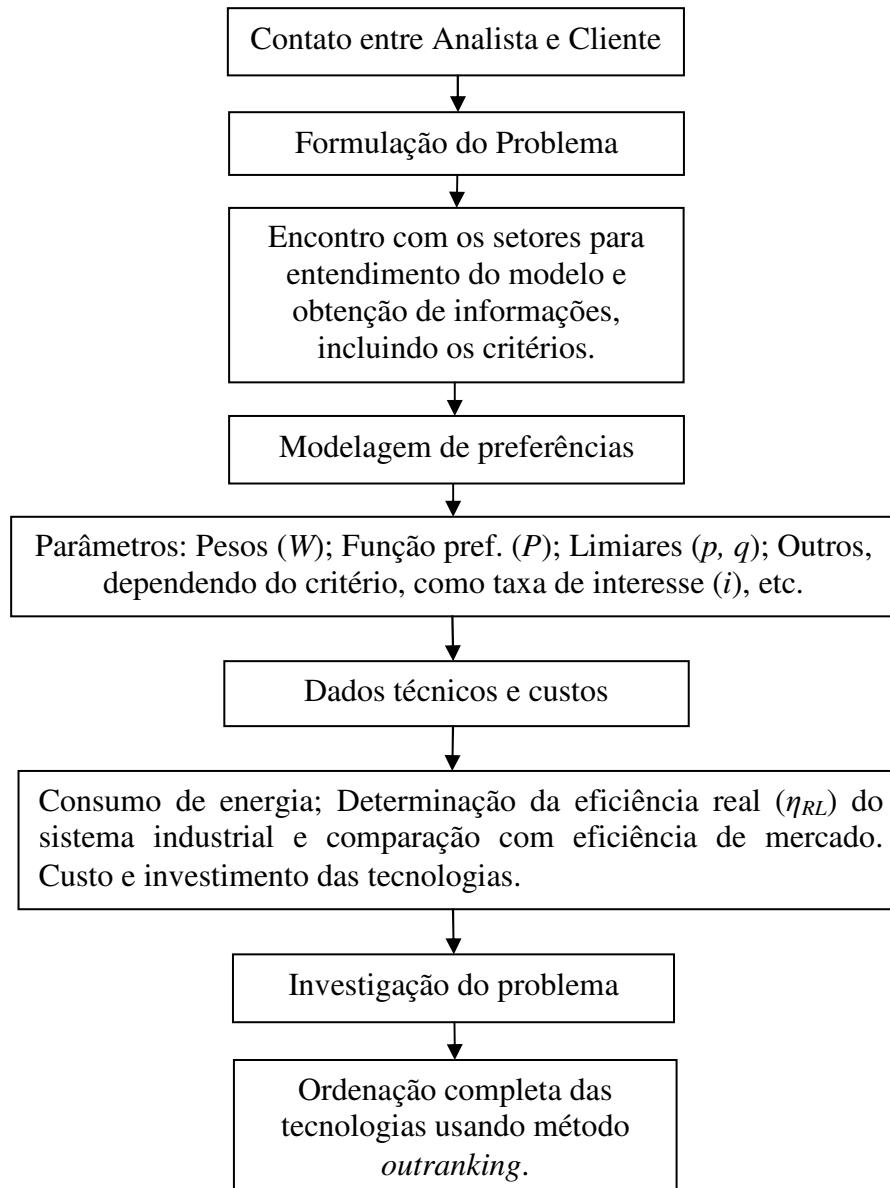


Figura 4.1 – Modelo para ordenação de tecnologias (elaboração do autor)

Na primeira etapa as tecnologias são identificadas e todos os dados técnicos são coletados para se determinar a eficiência real e comparar com as tecnologias de mercado, bem como levantar custos de operação e valores de investimento. A empresa pode optar por avaliar apenas um sistema industrial de energia ou avaliar todos os sistemas de energia.

Na segunda etapa o analista obtém as preferências com o objetivo de construir o modelo de decisão e ordenar as tecnologias para substituição. A partir da matriz de avaliação é feita a ordenação completa usando um método *outranking* e são realizadas as análises pertinentes, como sensibilidade. Finalmente, são feitas as recomendações. A ordenação pode ser usada para um estudo mais detalhado a ser definido com o decisor, objeto da situação II.

4.3.1 Critérios técnicos

Existem razões técnicas para a adoção de critérios que tenham influência na substituição das tecnologias utilizadas. Alguns critérios são encontrados na literatura, mas não utilizados em um modelo multicritério. Na sequência são apresentados os critérios comumente destacados pela literatura, embora outros possam ser utilizados dependendo do processo e da empresa.

Fator operação – Quando uma tecnologia opera fora das especificações pode haver redução da eficiência e até da sua vida útil. Em um sistema motriz, por exemplo, um motor de indução que opera com carregamento muito baixo apresenta perda de eficiência. Motores com carregamento acima do nominal podem ter a vida útil reduzida (McCoy & Douglass, 2000).

Confiabilidade – As tecnologias que operam nas indústrias às vezes apresentam problemas de operação, com índices altos de paradas devido a falhas ou alta taxa de rejeição de produtos. Uma elevada ‘taxa de falha’ pode indicar a inadequação da tecnologia em relação aos requisitos necessários para a produção e podem ser um critério importante. O ‘tempo remanescente de vida útil’ é outro critério que indica quanto tempo existe até a tecnologia perder suas funções e é determinado pela diferença entre a ‘vida média’ e o ‘tempo de vida atual’. A ‘vida média’ é estimada pela análise do ‘tempo de falha’ o ‘tempo de vida atual’ depende de análise do ciclo de vida da tecnologia (Mazhar *et al.*, 2007). Esses critérios são aplicáveis a qualquer tecnologia, como motores de indução (DOE, 2008; Lung *et al.*, 2005).

Condições de serviço – Todas as tecnologias são dimensionadas para operar em certas condições como, por exemplo, os motores de indução, por exemplo, com tensão e frequência adequadas, carcaça apropriada ao ambiente, temperatura ambiente dentro das especificações, altitude, etc. (DOE, 2008; NEMA, 2002). Portanto, ‘condições ambientais’ é um critério importante.

Potencial de economia de energia – A ‘quantidade economizada de energia’ e o ‘valor economizado de energia’ indicam o nível de perda de energia da tecnologia em operação e constituem critérios importantes em projetos de melhoria da eficiência energética. Além da efetividade ou desempenho da tecnologia, a economia de energia é uma força importante para adoção de projetos de eficiência energética (Lung *et al.*, 2005). A Quantidade Economizada de Energia (*QEE*) é a diferença entre a energia consumida e as perdas.

4.3.2 Critérios financeiros

Diversos critérios financeiros podem ser utilizados, conforme segue.

Valor do Investimento na Tecnologia (VIT) – É um critério essencial para a implementação de um projeto de eficiência energética, que leva em conta o valor da aquisição mais o custo de instalação. É um critério conflitante, uma vez que tecnologias com alto nível de eficiência normalmente são mais caras.

Orçamento – O investimento em um projeto depende dos recursos financeiros que a empresa tem disponível para investimentos. Portanto, esse é um critério limitador. A falta de recursos pode constituir uma barreira para projetos na área energética, principalmente para pequenas e médias empresas (Nagesha & Balachandra, 2006).

Valor Economizado de Energia (VEE) – Considerando a Quantidade Economizada de Energia (*QEE*) em kWh/ano e o custo da energia (*C*), o *VEE* é determinado pela Equação 4.1

$$VEE = QEE \cdot C \quad [R\$ / ano] \quad (4.1)$$

Tempo de Retorno Simples (TRS) – Apesar de evidências mostrando que o tempo de retorno simples tem um papel de apoio a outros critérios de decisão, por ignorar o ganho após o período de retorno financeiro, esse critério tem sido amplamente usado como ferramenta de decisão conforme a literatura (Anderson & Newell, 2004; Lefley, 1996). Muitas empresas ainda utilizam apenas o critério *TRS* como ferramenta de decisão (Lung *et al.*, 2005). Considerando o *VIT* (*ou VIM para motor*) e o *VEE*, o *TRS* é dado pela Equação 4.2

$$TRS = \frac{VIT}{VEE} \quad [Anos] \quad (4.2)$$

Valor Presente Líquido (VPL) – Ao contrário do TRS, o *VPL* indica a lucratividade do investimento (Lefley, 1996) e é utilizado para comparar projetos. Considerando o *VEE*, o *VIT*, o tempo de vida útil da tecnologia (*n*) em anos e a taxa anual de retorno de investimento (*i*), o *VPL* é determinado pela Equação 4.3.

$$VPL = VEE \cdot \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n} \right] - VIT \quad [R\$] \quad (4.3)$$

Taxa Interna de Retorno (TIR) – Essa taxa em relação ao fluxo de caixa do projeto indica o retorno pago pelo investimento, permitindo uma comparação com o custo do capital considerado no projeto (Lung et al, 2005). O cálculo é feito igualando o *VPL* a zero.

Custo do ciclo de vida – trata-se de uma análise econômica que leva em conta os seguintes custos: capital inicial, manutenção, energia, depreciação, efeitos na produção, valor de sucata e outros custos anuais (DOE, 2008).

4.3.3 Agregação dos critérios para recomendação: ordenação das tecnologias

Após a definição de todos os critérios $F=\{g_1, g_2, \dots, g_j, \dots, g_n\}$ pelos setores, os pesos w_j para cada um é estabelecido pelo decisor e/ou *stakeholders*. Algumas técnicas podem ser utilizadas para a definição dos pesos dos critérios (Al-Kloub et al., 1997; Figueira & Roy, 2002). Quanto maior o peso, maior a importância do critério (Brans & Mareschal, 2005). Com os pesos normalizados, o somatório é igual a 1. Ao se comparar duas ações, a preferência será pelo valor maior caso o critério for maximizado e será pelo valor menor, se for minimizado.

Seja $M=\{m_1, m_2, m_3, \dots, m_n\}$ um conjunto finito de tecnologias a serem analisadas, F uma família coerente de critérios e $g_j(m_i)$ o valor da tecnologia m_i com relação ao j th critério. A estrutura de preferência do método *outranking* é baseada na comparação par-a-par. Assim, o desvio (d) é a diferença entre o valor de duas alternativas e é dado pela seguinte expressão: $d(m_1, m_2) = g_j(m_1) - g_j(m_2)$. A relação pode ser de indiferença (I), de preferência fraca (Q) e preferência estrita (P). No caso de um pseudo-critério j , dois limiares são considerados: o limiar preferência (p) é o menor desvio acima do qual existe uma preferência estrita do decisor; o limiar indiferença (q) é o maior desvio abaixo do qual não há preferência do decisor. Quanto maior o desvio, maior a preferência. É importante ressaltar que a existência ou não dos limiares depende da estrutura de preferências do decisor e isso determina o tipo de critério utilizado (Roy, 1996; Vincke, 1992).

4.4 Situação II – seleção de portfólio

A Figura 4.2 apresenta o modelo para seleção de portfólios englobando as duas etapas.

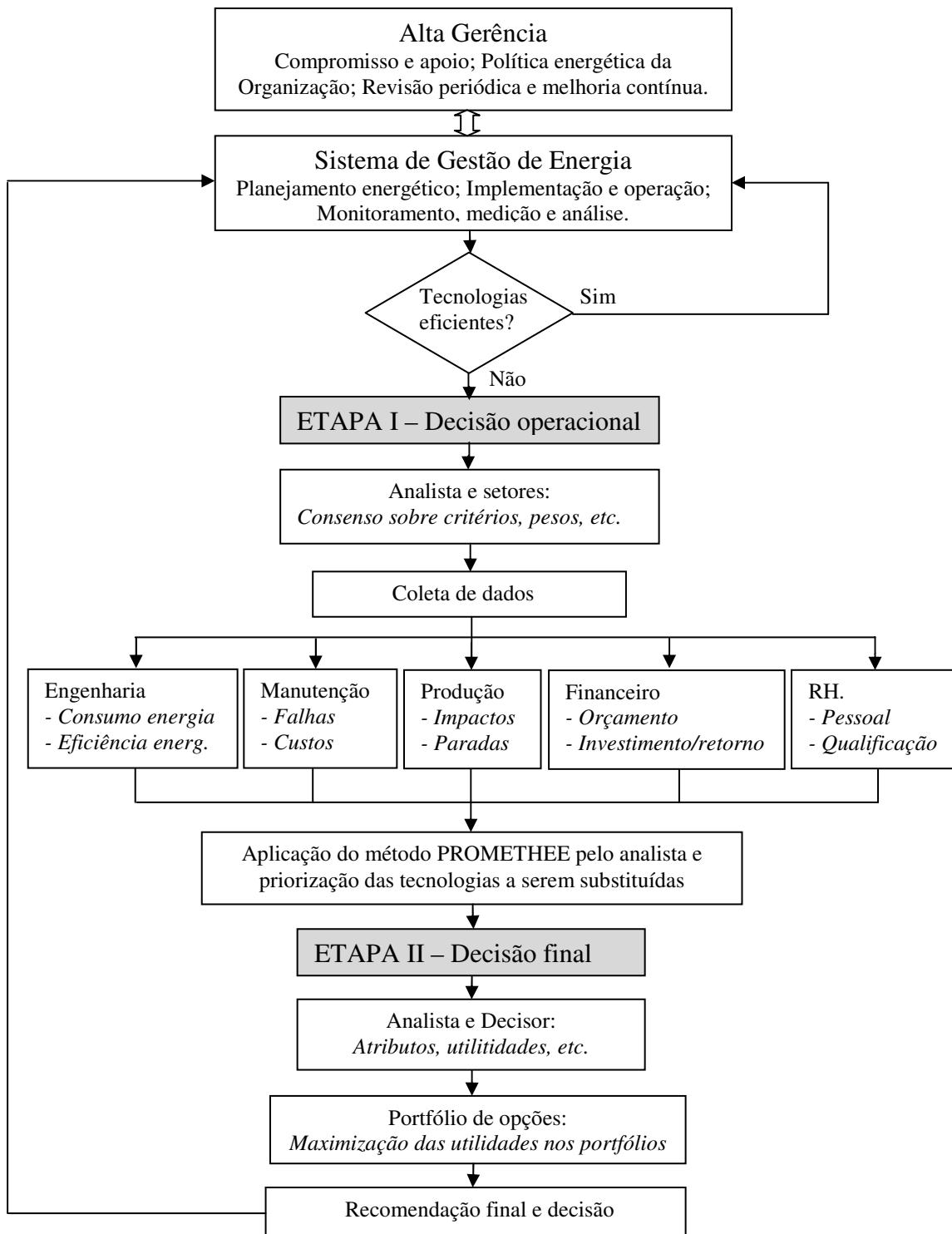


Figura 4.2 – Modelo para seleção de portfólios (Proposta do Autor)

Como qualquer ação dentro da empresa, o modelo para substituição de tecnologias em sistemas industriais de energia deve estar alinhado com os interesses da Alta Gerência da empresa. O modelo proposto deve ser articulado com a área de Gestão de Energia da empresa, que é responsável pela elaboração de um planejamento energético, implementação e operação de ações ligadas à área de energia, bem como o monitoramento, medição e análise do desempenho dos sistemas energéticos. Isso é importante para que a empresa desenvolva um planejamento estratégico para substituição das tecnologias a partir da decisão tomada.

4.4.1 Decisão operacional

Na primeira etapa o analista e os representantes dos setores da empresa se encontram com o objetivo de compreender o problema de decisão e definir os critérios operacionais e os respectivos pesos. Os critérios são definidos pelos setores, conforme exemplos citados na seção 4.2. Nessa etapa o analista tem um papel importante no sentido de fazer a articulação com os setores, buscando conhecer suas preocupações e as necessidades de todas as áreas. Com relação à participação do analista no processo, uma abordagem construtiva é recomendada considerando que o processo tem que ser debatido e construído com a participação e o consenso da equipe.

4.4.2 Decisão final

Nesta etapa o Analista e o Decisor se encontram para o estabelecimento dos critérios ou atributos e de outros parâmetros de decisão. Diversos são os critérios que podem ser definidos pelo decisor, conforme descrito no item 4.2.2. O método UTASTAR, que segue os princípios do MAUT, é utilizado para determinação das utilidades do decisor. O método UTASTAR foi escolhido por duas razões: em primeiro lugar as utilidades são encontradas a partir de uma ordenação prévia de ações, que é o caso das tecnologias priorizadas no nível operacional; em segundo lugar o método usa um procedimento matemático para determinar a função utilidade, reduzindo o tempo de interação com o decisor e evitando erros devido à educação direta.

As utilidades para os múltiplos atributos são determinadas pela aplicação da técnica de programação linear, seguindo os princípios da Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT), como a monotonicidade das preferências. Os procedimentos do UTASTAR são os seguintes:

I) Inicialmente os limites dos atributos previamente definidos pelo analista junto ao decisior são divididos em α intervalos iguais, do pior nível (g_{ij}^*) para o melhor (g_{ij}^{**}), com o objetivo de encontrar a utilidade marginal. O valor marginal $g(M) \in [u_i(g_i^j), u_i(g_i^{j+1})]$ de uma ação M para o critério i é calculado por interpolação linear conforme a Equação 4.4.

$$u_i[g_i(M)] = u_i(g_i^j) + \frac{g_i(M) - g_i^j}{g_i^{j+1} - g_i^j} [u_i(g_i^{j+1}) - u_i(g_i^j)] \quad (4.4)$$

Os valores são interpolados dentro dos intervalos definidos, utilizando a Equação 4.4. O resultado encontrado servirá de base para a determinação das utilidades marginais e da utilidade para cada motor posteriormente. O valor marginal deverá estar posicionado entre o valor médio do intervalo e o valor de maior preferência (princípio da monotonicidade).

A utilidade (u_i) para cada motor, no critério i , é representada em termos de variáveis (w), conforme a Equação 4.5.

$$\begin{cases} u(g_i^1) = 0 & \forall i = 1, 2, \dots, n \\ u_i(g_i^j) = \sum_{t=1}^{j-1} w_{it} & \forall i = 1, 2, \dots, n ; j = 2, 3, \dots, \alpha \\ w_{it} = u_i(g_i^{j+1}) - u_i(g_i^j) \geq 0 \end{cases} \quad (4.5)$$

II) O método introduz dois erros, um superestimado (σ^+) e outro subestimado (σ^-). Cada par de ações consecutivas é comparado conforme a Equação 4.6.

$$\Delta(M_k, M_{k+1}) = u[g(M_k)] - \sigma^+(M_k) + \sigma^-(M_k) - u[g(M_{k+1})] + \sigma^+(M_{k+1}) - \sigma^-(M_{k+1}) \quad (4.6)$$

III) A partir da matriz obtida pela diferença de duas ações consecutivas, a programação linear (4.7) é resolvida para a determinação dos valores globais, minimizando os erros, para as m ações, com δ sendo um valor positivo pequeno, como segue.

$$\begin{cases} [\min] Z = \sum_{k=1}^m [\sigma^+(M_k) + \sigma^-(M_k)] \\ \text{sujeito a} \\ \Delta(M_k, M_{k+1}) \geq \delta \quad \text{se} \quad M_k \succ M_{k+1} \quad \forall k \\ \Delta(M_k, M_{k+1}) = 0 \quad \text{se} \quad M_k \approx M_{k+1} \\ \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^{\alpha_i} w_{it} = 1 \\ w_{it} \geq 0, \quad \sigma^+(M_k) \geq 0, \quad \sigma^-(M_k) \geq 0 \quad \forall i, j \text{ e } k \end{cases} \quad (4.7)$$

IV) Uma análise pós-otimização é feita para testar a existência de outras soluções. Uma programação linear é feita considerando os erros iguais a zero e maximizando a função objetivo (Equação 4.8). Para múltiplas soluções o resultado final é a média das soluções.

$$u(g_i^*) = \sum_{t=1}^{\alpha_i} w_{it} \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (4.8)$$

Os valores encontrados a partir da programação linear (etapas III ou IV do UTASTAR) representam a solução final e são usados para determinar as utilidades marginais e a utilidade para cada motor, conforme Equação 4.9.

$$U_k(M_{kp}) = \sum_{i=1}^n [(1 - r_i) \cdot u_i(g_i^j) + r_i \cdot u_i(g_i^{j+1})] \quad (4.9)$$

$\forall j = 1, 2, \dots, \alpha; \quad k = 1, 2, \dots, m \text{ and } p = A, B, \dots$

Onde,

$$\left\{ \begin{array}{l} r_i = \frac{g(M_i) - g_i^j}{g_i^{j+1} - g_i^j} \\ u_i(g_i^j) = w_{it} \quad \forall i = 1, 2, \dots, n; \quad t = 1, 2, \dots, \alpha; \quad j = 2, 3, \dots, \alpha \\ \text{se } w_{it} < w_{i(t-1)} \Rightarrow u_i(g_i^j) = u_i(g_i^{j-1}) \\ u_i(g_i^1) = 0 \quad e \quad u_i(g_i^{\alpha+1}) = \sum_{t=1}^{\alpha} w_{it} \end{array} \right.$$

Considerando todas as opções dos portfólios, o objetivo é encontrar o portfólio com o melhor *mix* de ações que represente a máxima utilidade do decisor. O objetivo é maximizar a utilidade nos portfólios, tendo como restrições valores de investimentos e o orçamento da empresa. A solução obtida pela programação linear (4.10) é recomendada ao decisor.

$$\left\{ \begin{array}{l} [\max] \quad U = \sum_{k=1}^m U(M_{kp}) \cdot x_{kp} \quad \forall p = A, B, C, \dots, H \\ \text{sujeito a} \\ \sum_{p=A}^H x_{kp} = 1 \quad \forall k = 1, 2, \dots, m \\ \sum_{p=A}^H x_{kp} \cdot VIT \leq \$Orçamento \\ x_{kp} \geq 0 \end{array} \right. \quad (4.10)$$

4.5 Análise do capítulo

A comparação entre o processo de apoio à decisão multicritério e o processo de modelagem energética em sistemas industriais de energia mostrou as diferenças com relação à abordagem do especialista, às ferramentas e à modelagem. Um modelo de decisão multicritério para substituição de tecnologias em sistemas industriais de energia é proposto com os seguintes princípios: comprometimento, multidisciplinaridade, ampla participação, intervenção pouco invasiva e acurácia.

Na situação I o modelo faz uma ordenação completa das tecnologias a serem substituídas. Na situação II, é necessário antes fazer a ordenação das tecnologias (situação I) para que seja feita a análise dos portfólios de opções. Neste caso o modelo permite um planejamento estratégico no médio e longo prazo para substituição das tecnologias, de acordo com as possibilidades financeiras e interesse da empresa.

O modelo é estruturado para ser aplicado no nível operacional para ordenação de tecnologias e no nível de decisão para seleção de portfólios de opções. O nível operacional requer participação de todos os setores e exige também conhecimento na área energética e na área de decisão. Com relação aos dados de energia o modelo segue o princípio *bottom-up*, com processo de auditoria energética. A abordagem do analista é construtiva e o método utilizado para ordenação das tecnologias é do tipo *outranking*. No nível de decisão é fundamental captar as preferências do decisor, portanto o método UTASTAR, que segue os princípios do MAUT, é utilizado para fazer a identificação da utilidade. Com a maximização da utilidade, o melhor *mix* de portfólios de opções é indicado ao decisor.

5 APlicaçãO DO MODELO NA INDÚSTRIA

Este capítulo apresenta a aplicação do modelo proposto em sistemas motrizes de uma indústria. A seção 5.1 descreve os sistemas motrizes. A seção 5.2 descreve o perfil da empresa estudada. A seção 5.3 apresenta a aplicação do modelo na situação I e a seção 5.4 mostra a aplicação do modelo na situação II. A seção 5.5 faz a análise dos resultados.

5.1 Sistemas motrizes

O sistema motriz é constituído pelo conjunto motor-carga, uma vez que os motores elétricos são utilizados em diversas aplicações do processo produtivo, como acionamento de ventiladores, esteiras, bombas e outras cargas (McKane *et al.*, 2007). Especificamente no setor industrial, que consome boa parte da energia, os sistemas motrizes são responsáveis pelo consumo da maior parte da eletricidade, com grande potencial de melhoria de eficiência energética (Anderson & Newell, 2004; Mecrow & Jack, 2008; Yanti & Mahlia, 2009).

A redução de perdas em sistemas motrizes pode ser obtida de diversos modos: melhoria da qualidade do suprimento de energia (Silva, 2005); uso de controladores de velocidade, correção de fator de potência, técnicas de manutenção, informação e educação, utilização de motores mais eficientes e adequação da carga (Saidur, 2010). Neste trabalho é considerada a melhoria da eficiência energética pela substituição de motores e adequação à carga.

No setor industrial brasileiro o potencial de economia de energia elétrica está fortemente concentrado em sistemas motrizes (CNI, 2009). Um dos fatores de perda de energia é a tecnologia obsoleta. A substituição de motores antigos por motores de alta eficiência pode resultar em rápido retorno de investimento e isso pode tornar-se um atrativo para as empresas, mas projetos nesse sentido precisam de um diagnóstico consistente (Saidel *et al.*, 2010). Outro meio de melhoria da eficiência energética é a adequação à carga. Um estudo estimou que apenas um terço dos motores nas indústrias brasileiras opera com carregamento acima de 75%, condição ideal para evitar perda de eficiência (Schaeffer *et al.*, 2005).

Como o conceito de eficiência energética é relativo, uma vez que só é possível dizer que um produto ou processo é energeticamente eficiente comparando-o, as eficiências dos motores que operam nas indústrias podem ser comparadas com as eficiências das tecnologias disponíveis no mercado. No Brasil, a partir de 2010, todos os motores fabricados são de alta eficiência, conforme Lei de eficiência energética (MME, 2005b).

Atualmente o mercado brasileiro oferece motores *standard* (classe IE1) com potência menor que 1 HP, motores alta eficiência (classe IE2) para atender à Portaria nº 553 da Lei de eficiência energética nº 10.295 e à norma ABNT NBR 17094 e também disponibilizam uma linha chamada *Premium* (classe IE3) com maior nível de eficiência (WEG, 2011). Essa melhoria nos níveis de eficiência dos motores se deve aos materiais e técnicas construtivas empregadas na fabricação (Saidel *et al.*, 2010). Uma nova classe de motores (IE4), denominada de *Super Premium Efficiency* trará níveis de eficiência energética maiores, mas ainda depende de uma norma (Almeida *et al.*, 2011). A Figura 5.1 mostra as eficiências de alguns motores tipo *Standard*, *Alto rendimento* e *Premium*. Dependendo do material e do fabricante, as diferenças das eficiências tipo *Standard* para *Premium* podem ser maiores.

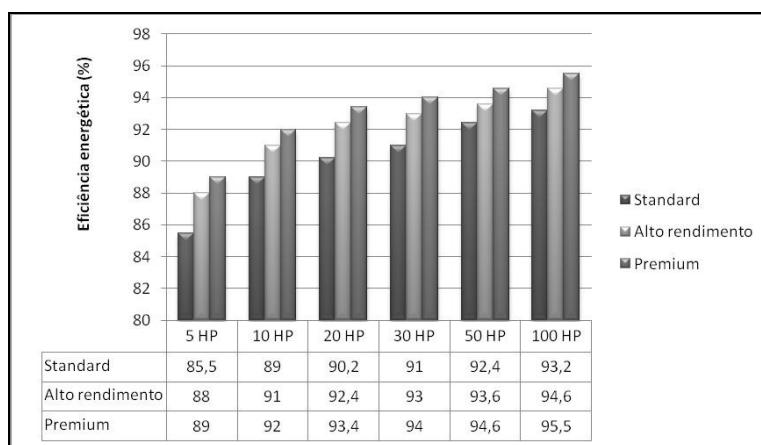


Figura 5.1 – Eficiências de motores de indução WEG, 4 polos (WEG, 2011)

Um estudo compara os ganhos de eficiência pela substituição de motores em operação nas indústrias brasileiras com a Lei da eficiência energética, conforme Tabela 5.1. Esse estudo servirá de referência para comparação com o resultado obtido pelo modelo proposto.

Tabela 5.1 – Ganhos típicos de eficiência de motores em indústria

Motores	Horas/ano	Ganho de eficiência
Até 10 CV	5.234	2,5%
De 10 CV a 40 CV	5.980	2,0%
De 40 CV a 100 CV	7.145	1,3%
Até 300 CV	7.478	1,6%

Fonte: Schaeffer *et al.* (2005)

5.2 Perfil da empresa estudada

A indústria onde o modelo foi aplicado é do ramo químico e está localizada na cidade de Ponta Grossa, Paraná, produzindo para o mercado interno e externo. O Paraná consome em torno de 7% da energia do país e o setor químico está entre os setores industriais com maior consumo de energia no estado, juntamente com Alimentos e bebidas, Papel e celulose, Cimento e Cerâmica (COPEL, 2009).

Na empresa estudada o contato inicial foi com o Engenheiro de projetos. A planta é alimentada com tensão de 380 volts e a potência média consumida pelo sistema motriz é de 150 kW, que representa aproximadamente 80% da demanda total consumida. O desbalanceamento de tensão, que indica a diferença entre as tensões nas três fases da rede, apresenta uma variação em torno de 2%, bem abaixo do máximo recomendado (10%) para evitar perdas elétricas e outros problemas operacionais (NEMA, 2002). Análise de harmônicos na rede, outra possível causa de perda de energia, não está contemplada neste estudo. Também não são considerados dispositivos de controle de motores, como chaves *soft start* e inversores de frequência.

Com relação à estrutura de comando, a empresa possui um Diretor comercial, que cuida do *marketing* da empresa e um Diretor industrial, responsável pela parte técnica e da produção. Inicialmente foi feita uma entrevista com o Diretor responsável pela área industrial, para conhecer o perfil da organização. O Diretor deixou claro que, quanto aos objetivos da empresa, o foco é o produto. As ações devem agregar qualidade aos produtos observando o custo-benefício, segundo ele. Os principais pontos da entrevista estão descritos a seguir.

- a) Visão da empresa sobre o uso racional de energia e ações de eficiência energética

Além de oportunidade de redução de custo a empresa acha importante a disseminação da conscientização para todos, para que não seja necessária uma ação de fiscalização sobre o funcionário, desde uma lâmpada acesa desnecessariamente até ações relativas ao próprio trabalho, como operação de motor, etc. A empresa quer um funcionário consciente, responsável e com conhecimentos.

b) Ações ligadas à área energética anteriormente

Houve aquisição de alguns motores de alto rendimento. Também foi feito um projeto de um gerador de energia para atender à demanda no horário de ponta, com o objetivo de redução do custo de energia, uma vez que a tarifa de energia elétrica nesse horário é muito elevada. O gerador foi instalado e hoje, com o aumento da demanda, ele está seminovo, mas subdimensionado. O Diretor atribui o fato à falta de visão de longo prazo no projeto, de alguns detalhes que pudessem subsidiar melhor a decisão. Mesmo se custasse um pouco mais caro, mas fosse atender em longo prazo, a decisão poderia ter sido outra, afirmou o Diretor.

c) Política de longo prazo para tecnologias energeticamente eficientes

A empresa não possui uma política nesse sentido, mas acredita que é importante e mostrou interesse em desenvolver um projeto de longo prazo na área de eficiência energética. Segundo o Diretor os fluxos energéticos e os processos precisam ser repensados. As ações de eficiência energética para serem implantadas na empresa têm que ter como prioridade o produto e atender ao critério de menor custo possível com o máximo de benefícios, para obter prioridade junto à Direção em termos de decisão.

d) Obstáculos para implantação de ações de eficiência energética

A Direção não vê obstáculos para a implantação de um projeto de eficiência energética na empresa. Existem alguns pontos destacados pelo Diretor, como a dificuldade de parar a fábrica para qualquer ação e a integração entre o pessoal da produção e o pessoal técnico. Existe um grande envolvimento dos gerentes e funcionários nas ações, mas paradas na produção exigiriam um alto nível de integração entre os setores.

e) Normas e procedimentos de tomada de decisão

Na há uma norma formal para tomada de decisão na empresa. Diante de uma necessidade, uma comissão composta normalmente por gerentes e especialistas da área realiza um projeto prévio detalhado e o encaminha para a análise da Direção. O Diretor enfatizou que a empresa não aposta em “testes de laboratório” ou “tentativa e erro”. A Direção decide com base em prioridades, sempre focando o produto da empresa.

f) Receptividade da empresa para iniciativa de funcionários em propor ações:

A empresa tem essa política e prestigia a iniciativa de funcionários. Um supervisor propôs a instalação de um gerenciador de energia. Depois de instalado houve redução de consumo de energia elétrica e o sistema também controlou a demanda para evitar custos desnecessários junto à empresa concessionária de energia. O Diretor destacou, no entanto, que na área energética o pessoal da empresa deve ser conscientizado e treinado, para que os funcionários tomem a iniciativa para as ações de conservação de energia. A empresa apostava na cooperação de todos os funcionários, supervisores e gerentes.

g) Incentivo da empresa à educação

Existe um programa de incentivos para funcionários na empresa, inclusive pós-graduação. Um dos supervisores da área técnica fez curso superior de Tecnologia em Automação Industrial, cursou especialização em Gestão Industrial e estava fazendo mestrado em Engenharia de Produção na época da pesquisa, tudo com o apoio da empresa.

h) Parceria com Universidade

Houve uma experiência de parceria com Universidade ligada à análise de produtos químicos. Não deu certo, pois, segundo o Diretor, o contrato era informal e a Universidade tinha uma agenda de trabalho e de atividades que comprometia o trabalho com a empresa. A empresa então resolveu investir em sua própria tecnologia e dispensou os serviços da Universidade. De um modo geral, o Diretor afirmou que a idéia de compartilhar conhecimento agrada a empresa, mas depende do comprometimento da Universidade.

5.3 Aplicação do modelo na situação I

Nesta etapa do trabalho foram feitos dois encontros na empresa. Atendendo solicitação da Direção, o primeiro encontro foi feito com funcionários, para apresentar a importância da eficiência energética e melhorar a conscientização de todos. No encontro com os setores, com o intuito de buscar o comprometimento de todos os envolvidos, o Analista explicou o propósito do trabalho, para que a definição dos parâmetros (5.3.1) fosse feita de forma consensual e a coleta de dados (5.3.2) a mais fidedigna possível. A ordenação dos motores

(5.3.3) é um trabalho que depende exclusivamente dos conhecimentos do Analista na área de decisão.

É imprescindível destacar a importância do especialista na área de energia, que neste caso é o próprio Analista. Caso o Analista não seja convedor da área de energia, faz-se necessária a presença do especialista nessa área, para que o trabalho seja feito em conjunto com o analista e com as áreas técnica e de produção da empresa.

5.3.1 Definição dos parâmetros

Utilizando uma abordagem construtiva, o Analista e o Decisor da empresa reuniram-se com os setores de engenharia, manutenção, produção e financeiro para definir os parâmetros. O decisor deixou as definições a cargo dos setores. Foram definidos, de forma consensual, os critérios, os pesos e os limiares de preferência (Tabela 5.2). Os critérios foram definidos considerando fatores tais como características das máquinas, operação, manutenção, produção e financeiro. Embora existam diversos critérios possíveis, os setores optaram por aqueles de maior relevância no contexto do nível operacional, conforme descritos a seguir.

Os setores escolheram o critério ‘potência’ (C1), pois os motores maiores estão em processos estratégicos e têm preferência na substituição. Em relação ao critério ‘importância para a produção’ (C2), os valores receberam da equipe uma nota de zero (motor menos importante) a 10 (motor mais importante). O ‘número de rebobinamentos’ (C3) indica quantas vezes os enrolamentos dos motores sofreram processo de queima, normalmente por sobreaquecimento. O ‘número de falhas’ (C4) mostra problemas de parada da máquina por problemas em peças, como rolamentos, por exemplo. O ‘Valor Presente Líquido – VPL’ (C5) foi calculado conforme a Equação 5.4. O VPL foi obtido para motores com eficiência *Premium*, que são as maiores referências do mercado brasileiro atualmente. O ‘carregamento do motor’ (C6), que também é um indicativo de perda de energia, foi determinado conforme a Equação 5.1. A equipe entendeu que o critério do motor ‘idade – anos em uso’ (C7) tem importância, mas com grau menor, uma vez que um processo adequado de manutenção preventiva pode reduzir perdas e prolongar a vida útil do equipamento.

Quanto aos pesos, a equipe entendeu que o critério ‘potência do motor’ é o mais importante para a produção, uma vez que os motores maiores estão em processos estratégicos, sendo atribuído a esse critério (C1) o peso igual a 100. Comparativamente, os pesos foram atribuídos aos demais critérios, conforme a preferência: C2=80; C3=60; C4=50; C5=50;

C6=40; C7=20. Os pesos são então normalizados (0 a 1). Esta etapa da definição dos parâmetros foi realizada em uma reunião de forma simples e rápida. Apenas um critério é de minimização (C6), indicando que a preferência é para motores com menor carregamento.

Com relação às funções de preferência, apenas o critério Valor Presente Líquido é do tipo Usual, uma vez que os setores afirmam que a preferência é a mesma para diferenças de valores acima de zero. As demais funções de preferência são escolhidas em virtude de a preferência variar com a diferença entre duas ações. Para cada critério são identificados junto ao Decisor e demais *stakeholders* os limiares de preferência (p) e de indiferença (q). Para os casos em que o limiar de indiferença é zero, então é escolhida a função tipo *V-Shape*, caso contrário, é usada a função do tipo *V-Shape com indiferença* (Seção 3.5.2, Figura 3.1). A Tabela 5.2 mostra os parâmetros dos critérios.

Tabela 5.2 – Parâmetros dos motores da indústria estudada

Critérios	Função prefer.	Pesos	Limiar	Limiar	Min
		normal.	preferência (p)	indiferença (q)	ou Max
C1 – Potência	V-Shape	0,250	45	0	Max
C2 – Importância p/ prod.	V-Shape ind.	0,200	5	1	Max
C3 – N° rebobinamentos	V-Shape	0,150	5	0	Max
C4 – N° falhas por ano	V-Shape	0,125	1	0	Max
C5 – Valor Presente Líquido	Usual	0,125	-	-	Max
C6 – Carregamento	V-Shape ind	0,100	75	5	Min
C7 – Idade - anos em uso	V-Shape ind	0,050	10	1	Max

Fonte: Compilado pelo autor a partir de informações dos setores da empresa e do decisor

5.3.2 Dados dos setores

Foram obtidos os dados de vinte motores para a montagem da matriz de avaliação visando à ordenação das tecnologias. Como a precisão dos dados é fundamental para reduzir as incertezas do projeto (McCoy & Douglass, 2000; Saidel *et al.*, 2010), algumas variáveis dos motores foram medidas e outras obtidas junto aos fornecedores. Para o estudo, conforme entendimento dos setores da empresa, foram utilizados motores de indução com potência igual ou superior a 5 HP, todos trabalhando 8640 horas/ano. Os dados de velocidade (rpm), corrente a vazio (I_0) e corrente nominal (I_N) são fornecidos pelo fabricante dos motores.

Em cada motor foi feita a medição da corrente elétrica real (I_R) e da potência real consumida (P_R). Foi utilizado um instrumento digital de medição da própria empresa, capaz de medir potência ativa, potência reativa, fator de potência, tensão e corrente elétrica. Foram obtidos junto ao mercado valores de investimento em motores com eficiência *Premium* (η_A). As eficiências (η_A) são de motores WEG *Premium* e não são necessariamente nominais, pois variam em função do carregamento (WEG, 2011). As eficiências reais (η_R) foram obtidas pela Equação 5.3. Os dados estão na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Dados dos motores elétricos da indústria estudada

Motor	Valores nominais				Valores reais medidos		Motores <i>Premium</i>	
	Veloc (rpm)	I_o (A)	I_N (A)	η_R (%)	I_R (A)	P_R (W)	η_A (%)	Investim. (R\$)
M1	3480	7,0	16,0	77,0	8,4	2131	80,0	1870
M2	3520	8,4	21,4	87,8	17,5	10068	91,5	2100
M3	1760	8,4	18,5	84,0	9,6	1887	84,9	1900
M4	1760	8,4	18,5	84,0	8,4	2220	86,0	1900
M5	3550	24,3	69,5	92,2	59,0	33983	94,0	7050
M6	1720	5,8	11,8	82,0	7,4	2320	87,0	1580
M7	1765	22,2	30,9	90,2	26,5	13729	93,4	2640
M8	1740	6,0	11,6	90,0	11,4	6092	91,0	1580
M9	3485	2,9	7,4	75,0	2,9	995	77,0	1220
M10	3500	4,4	10,7	76,0	5,0	1767	80,0	1530
M11	1760	8,4	18,5	85,0	8,5	3291	86,0	1900
M12	3530	7,0	14,7	75,0	7,9	1691	76,0	1870
M13	3530	17,4	41,7	90,2	27,0	12406	92,4	4100
M14	1770	20,8	57,6	91,7	60,0	33843	94,4	5540
M15	1765	8,1	15,0	83,0	9,9	2876	87,0	1790
M16	3500	4,4	11,1	86,0	8,6	4684	88,0	1530
M17	3500	4,6	11,6	87,0	8,7	4437	88,0	1530
M18	3500	4,6	10,9	88,5	8,9	4805	89,5	1530
M19	1730	6,4	15,0	82,0	7,6	1910	84,0	1790
M20	3485	3,0	7,5	80,0	4,4	1958	84,0	1220

Fonte: Elaboração própria

Para se determinar a eficiência do motor em operação, bem como a quantidade e o valor economizado de energia, é necessário antes estimar o carregamento. O carregamento do motor é definido como a relação entre a potência de saída e a potência nominal do motor (Kosov, 1986). Quando o motor trabalha com a potência muito acima da necessária para realizar a tarefa ele apresenta baixo carregamento, implicando em perda de energia.

Em um sistema motriz o carregamento pode ser obtido de diversos modos. O método da potência utiliza a eficiência nominal, nem sempre disponível em motores antigos. O método da corrente é linear e não tem boa precisão devido à curva da corrente em função do carregamento. O método do escorregamento é pouco preciso devido ao alto grau de variabilidade desse parâmetro (McCoy e Douglass, 2000). Neste trabalho foi utilizado um modelo matemático que simula a curva característica da corrente em função do carregamento, que apresenta boa precisão (Garcia, 2003; Sola & Xavier, 2007). A partir dos dados da Tabela 5.3 o carregamento é obtido pela Equação 5.1, considerando a corrente real medida no motor (I_R), a corrente nominal (I_N) e a corrente a vazio (I_o), bem como o parâmetro α da curva da corrente em função do carregamento do motor (Equação 5.2).

$$\gamma = 1 + \frac{1}{\alpha} \ln \left(\frac{I_R}{I_N} \right) \quad (5.1)$$

$$\alpha = -\ln \left(\frac{I_o}{I_N} \right) \quad (5.2)$$

A eficiência real do motor em operação (η_R) é definida como a relação entre a potência de saída e a potência de entrada (Kosow, 1986) e é determinada considerando a potência nominal do motor em *Horse-Power* (P_{HP}), com 1HP=746 Watts, a potência real medida em Watt (P_R) e o carregamento percentual estimado (γ), conforme a Equação 5.3.

$$\eta_R = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} = \frac{746 \cdot P_{HP} \cdot \gamma}{P_R} \quad [\%] \quad (5.3)$$

O cálculo do Valor Presente Líquido (*VPL*), conforme a literatura (Marques *et al.*, 2006; McCoy & Douglass, 2000), considera na Equação 5.4: o tempo de vida útil do motor (n) definido em 15 anos; a taxa de interesse da empresa (i) de 12% ao ano; o valor economizado de energia (*VEE*) conforme Equação 4.1 e o valor do investimento no motor de alta eficiência (*VIM*), considerado na ordenação o motor *Premium*, conforme Tabela 5.3.

$$VPL = VEE \cdot \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n} \right] - VIM \quad [R\$] \quad (5.4)$$

O cálculo do custo da energia (C) na Equação 4.1 segue as regras da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2000), conforme os horários de utilização e o período do ano. A planta possui um sistema de geração própria no horário de ponta (3 horas por dia), com um custo de R\$0,51/kWh, um terço do preço da tarifa da concessionária de energia. Fora do horário de ponta a empresa utiliza a energia da concessionária, com custo de R\$0,20107/kWh nos cinco meses úmidos do ano e R\$0,21883/kWh nos sete meses secos.

Os dados dos vinte motores estão na matriz de avaliação, conforme a Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – *Matriz de avaliação dos motores a serem ordenados*

Motores	C1 (HP)	C2 (nota 0-10)	C3 (quant.)	C4 (quant/ano)	C5 (R\$)	C6 (%)	C7 (anos)
M1	10	5	2	1	8872	22	5
M2	15	5	1	0,5	52440	79	5
M3	12,5	10	0	0	859	17	2
M4	12,5	10	0	0	5039	20	2
M5	50	10	0	0	78104	84	2
M6	7,5	10	5	1	18017	35	40
M7	20	5	0	0	60574	83	5
M8	7,5	8	0	0	7328	98	4
M9	5	7	1	0,5	2252	20	7
M10	7,5	9	1	0,5	10342	24	10
M11	12,5	10	0	0	3243	30	1
M12	10	10	0	0	1120	17	1
M13	30	10	0	0	34975	50	1
M14	40	10	2	1	122638	104	4
M15	10	8	2	1	15981	32	7
M16	7,5	5	2	1	12777	72	1
M17	7,5	9	0	0	5247	69	10
M18	7,5	8	0	0	5685	76	7
M19	10	7	0	0	4323	21	8
M20	5	7	1	1	11312	42	7

Fonte: Elaboração própria

5.3.3 Ordenação dos motores

Nesta fase foi utilizado o método PROMETHEE II para a ordenação completa dos motores. Além de ser fácil de entender, tanto pelo analista como pelos demais atores, o desvio entre duas ações com relação a um critério é determinado a partir de uma função matemática previamente escolhida. Outro ponto é o baixo nível de interação com os atores, reduzindo o tempo e as incertezas no processo de modelagem. Com relação à aplicação do método e a análise dos resultados, o software *D-sight* tem uma interface amigável, possui a ferramenta GAIA para análise dos parâmetros e recursos para teste de sensibilidade.

Considerando dois motores m_1 e m_2 , pertencentes a um conjunto M , a função preferência P e o peso w para cada critério j , o índice de agregação é dado pela Equação 5.5.

$$\pi(m_1, m_2) = \sum_{j=1}^k P_j(m_1, m_2) \cdot w_j \quad (5.5)$$

Para um número n de motores, o fluxo positivo indica o quanto o motor m_1 sobreclassifica todos os outros (x), conforme Equação 5.6. O fluxo negativo indica o quanto o motor m_1 é sobreclassificado por todos os outros e é expressa pela Equação 5.7.

$$\phi^+(m_1) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(m_1, x) \quad (5.6)$$

$$\phi^-(m_1) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(x, m_1) \quad (5.7)$$

O PROMETHEE II faz a ordenação completa dos motores, a partir do fluxo líquido, conforme a Equação 5.8.

$$\phi(m_1) = \phi^+(m_1) - \phi^-(m_1) \quad (5.8)$$

A análise GAIA mostra a relação entre os critérios, considerando-os como vetores e analisando suas direções. Critérios que expressam preferências similares são orientados aproximadamente na mesma direção. Os critérios com preferências conflitantes são orientados em direções opostas. Se as direções são ortogonais não há relação entre as preferências.

A partir dos dados da matriz de avaliação (Tabela 5.4), o software *D-Sight* foi usado para a determinação do fluxo positivo (Equação 5.6), do fluxo negativo (Equação 5.7) e do fluxo líquido (Equação 5.8) para a ordenação completa dos motores. Os dados estão dispostos na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Ordenação completa dos motores estudados

Ordenação	Motor	Φ	Φ^+	Φ^-
1	M14	0,384	0,470	0,086
2	M6	0,371	0,450	0,079
3	M5	0,248	0,394	0,146
4	M15	0,172	0,278	0,106
5	M13	0,135	0,282	0,146
6	M10	0,084	0,220	0,136
7	M20	0,035	0,216	0,181
8	M1	-0,002	0,232	0,234
9	M2	-0,055	0,194	0,248
10	M4	-0,057	0,154	0,211
11	M16	-0,062	0,208	0,271
12	M11	-0,098	0,132	0,230
13	M7	-0,115	0,169	0,284
14	M3	-0,120	0,123	0,243
15	M9	-0,123	0,127	0,250
16	M12	-0,125	0,121	0,246
17	M17	-0,128	0,111	0,239
18	M19	-0,161	0,097	0,258
19	M18	-0,178	0,083	0,261
20	M8	-0,206	0,078	0,285

Fonte: Elaboração própria a partir da aplicação do método

5.4 Aplicação do modelo na situação II

A empresa estudada não tem um Sistema de Gestão de Energia formalmente estruturado, mas mostrou-se interessada em desenvolver o trabalho com essa visão. Os procedimentos de ordenação são similares aos descritos na seção 5.3. A aplicação do modelo na situação II necessita da ordenação das tecnologias (situação I). A partir da ordenação (Tabela 5.5) foram priorizados os oito primeiros motores para estudo detalhado. Os oito motores assumem a denominação em ordem de preferência: M₁, M₂, M₃, M₄, M₅, M₆, M₇, M₈.

Para a decisão final, além de substituição dos motores por outros com melhor eficiência, foi considerada também a possibilidade de melhoria da eficiência energética pela adequação de carga. Uma nova pesquisa de mercado foi realizada, considerados três fornecedores diferentes, cada um com tecnologias e preços distintos. Oito portfólios foram estruturados como mostra a Tabela 5.6.

Tabela 5.6– Portfólios de opções de tecnologias a serem analisados

Portfólio	Fornecedores	Substituição de motor
A	I	Alto rendimento mantendo a mesma potência
B	I	Alto rendimento com potência diferente (adequação de carga)
C	I	<i>Premium</i> mantendo a mesma potência
D	I	<i>Premium</i> com potência diferente (adequação de carga)
E	II	Alto rendimento mantendo a mesma potência
F	II	Alto rendimento com potência diferente (adequação de carga)
G	III	Alto rendimento mantendo a mesma potência
H	III	Alto rendimento com potência diferente (adequação de carga)

Fonte: Elaborado pelo Autor

A partir dos motores priorizados o analista identificou com o Decisor os principais limites, considerando o melhor e o pior nível, como mostra a Tabela 5.7. Os limites para os atributos – *VIM*, *VEE* e *VPL* – foram definidos baseados nos valores do projeto. O *VIM* considera apenas o custo de aquisição e instalação, mas não inclui descontos pela troca do motor antigo. Os custos de operação e manutenção são considerados constantes no estudo.

Tabela 5.7– Níveis dos atributos estabelecidos pelo decisor

ATRIBUTO	Unid.	Pior nível (g_i^*)	Melhor nível (g_i^{**})
C_i			
C_1 – Valor do Investimento no motor (<i>VIM</i>)	R\$	7017	417
C_2 – Valor anual economizado de energia (<i>VEE</i>)	R\$	0	2075
C_3 – Valor Presente Líquido (<i>VPL</i>)	R\$	0	4540
C_4 – Tempo de Retorno Simples (<i>TRS</i>)	Anos	6	0

Fonte: Preferências do Decisor

Para o cálculo do *VPL* a taxa de retorno é de 12% ao ano e o tempo de vida útil dos motores é 15 anos. Com relação ao *TRS*, normalmente o decisor considera como viável um projeto com retorno menor que quatro anos. Considerando que os motores priorizados possuem grande impacto na produção e longo tempo de vida útil, foi considerado, para efeito de análise, o limite do tempo de retorno do investimento máximo de seis anos. Logicamente deve ser observado o tempo máximo de quatro anos para o projeto como um todo.

Os valores apresentados no Apêndice 1 (Tabela A1.1 a Tabela A1.8) são interpolados dentro dos intervalos da Tabela 5.8, utilizando a Equação 4.4.

Tabela 5.8– Intervalos para interpolação dos valores dos atributos

Atributo	g_{ij}					$\alpha=5$
	g_{i1}^*	g_{i2}	g_{i3}	g_{i4}	g_{i5}	g_{i6}^*
<i>VIM</i>	7017	5697	4377	3057	1737	417
<i>VEE</i>	0	415	830	1245	1660	2075
<i>VPL</i>	0	908	1816	2724	3632	4540
<i>TRS</i>	6	4,8	3,6	2,4	1,2	0

Fonte: Elaborado pelo Autor

A programação linear (4.7) foi resolvida para as 64 ações (Apêndice 1– Tabela A1.1 a Tabela A1.8) considerando os seguintes parâmetros do programa Solver: tempo máximo=120s; interações=600; precisão=0.000001; tolerância=2%; convergência=0,00001.

A análise pós-otimização foi realizada, mas não apresentou outras soluções. Desse modo, são adotados os resultados que estão na Tabela 5.9, onde as constantes k_i são obtidas pela soma de w_{it} . A utilidade para cada ação, para os múltiplos atributos, pode ser escrita pela

$$\text{função utilidade: } u(g_k) = \sum_{i=1}^n k_i \cdot u_i .$$

Como não houve outras soluções próximas da solução encontrada, as utilidades são determinadas pelos valores globais obtidos a partir da aplicação da programação linear (4.7). A partir da Tabela 5.9 as utilidades marginais são dispostas na Tabela 5.10 As utilidades dos portfólios dos motores estão sintetizadas por motor e por portfólio na Tabela 5.11 e estão detalhadas em cada um dos portfólios no Apêndice 1 – Tabela A1.9 a Tabela A1.16.

Tabela 5.9 – Valores da programação linear

Atributo (i)	w_{it}					$RHS: \delta=0.01$
	w_{i1}	w_{i2}	w_{i3}	w_{i4}	w_{i5}	
VIM	0,0035	0,0055	0,0253	0,0008	0,0846	0,1197
VEE	0,0000	0,0351	0,0013	0,0000	0,0886	0,1250
VPL	0,0282	0,0199	0,0636	0,0000	0,1618	0,2735
TRS	0,0063	0,0024	0,0023	0,2097	0,2611	0,4818

Fonte: Cálculo feito pelo autor

Tabela 5.10 – Utilidades marginais

Atributo (i)	$u_i(g_i^j)$					
	$u_i(g_i^1)$	$u_i(g_i^2)$	$u_i(g_i^3)$	$u_i(g_i^4)$	$u_i(g_i^5)$	$u_i(g_i^6)$
VIM	0,0000	0,0035	0,0055	0,0253	0,0253	0,1197
VEE	0,0000	0,0000	0,0351	0,0351	0,0351	0,1250
VPL	0,0000	0,0282	0,0282	0,0636	0,0636	0,2735
TRS	0,0000	0,0063	0,0063	0,0063	0,2097	0,4818

Fonte: Cálculo do Autor

Tabela 5.11 – Utilidades dos motores nos portfólios

Motores	$U_k(M_{kp})$							
	A	B	C	D	E	F	G	H
M_1	0,0854	0,0772	0,3800	0,3435	0,0693	0,0677	0,0708	0,0726
M_2	0,0672	0,1340	0,0471	0,2357	0,0997	0,1436	0,0966	0,3061
M_3	0,0000	0,0000	0,0675	0,0675	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
M_4	0,0560	0,0923	0,0000	0,0805	0,0864	0,1152	0,0000	0,1189
M_5	0,0000	0,0000	0,0402	0,0795	0,0000	0,0000	0,0253	0,0000
M_6	0,0000	0,3327	0,0533	0,2305	0,0000	0,3166	0,0658	0,2461
M_7	0,0000	0,1349	0,0734	0,1186	0,0000	0,1331	0,1087	0,0000
M_8	0,0000	0,3527	0,0000	0,2705	0,0000	0,3509	0,0000	0,1366

Fonte: Cálculo do Autor

Com o objetivo de encontrar o portfólio com melhor *mix* de ações que maximize as utilidades do decisão, a programação linear (4.10) foi resolvida, considerando as utilidades da Tabela 5.11 e os valores de investimentos nos motores (Apêndice 1). O valor do orçamento foi limitado em R\$20.000,00. Mais de um portfólio ($p=A, B\dots H$) pode ser incluído na solução, mas dentre todos os motores ($M_{1p}, M_{2p}, \dots M_{8p}$) somente um pode estar na solução final. O portfólio com o melhor *mix* é: $M_{1C} - M_{2H} - M_{3C} - M_{4H} - M_{5D} - M_{6B} - M_{7B} - M_{8B}$.

5.5 Análise dos resultados

5.5.1 Análise da situação I

Como o modelo foi aplicado para melhoria da eficiência energética, é feita uma análise de desempenho energético. Na situação I a ordenação foi feita tendo como referência motores com eficiência *Premium*. Uma análise dos oito primeiros motores ordenados mostra que a economia de energia tende a ser maior nos primeiros motores, conforme o gráfico de correlação (Figura 5.2). Isso é importante uma vez que a empresa pode investir o retorno financeiro obtido com os primeiros motores na aquisição de novas tecnologias energeticamente eficientes.

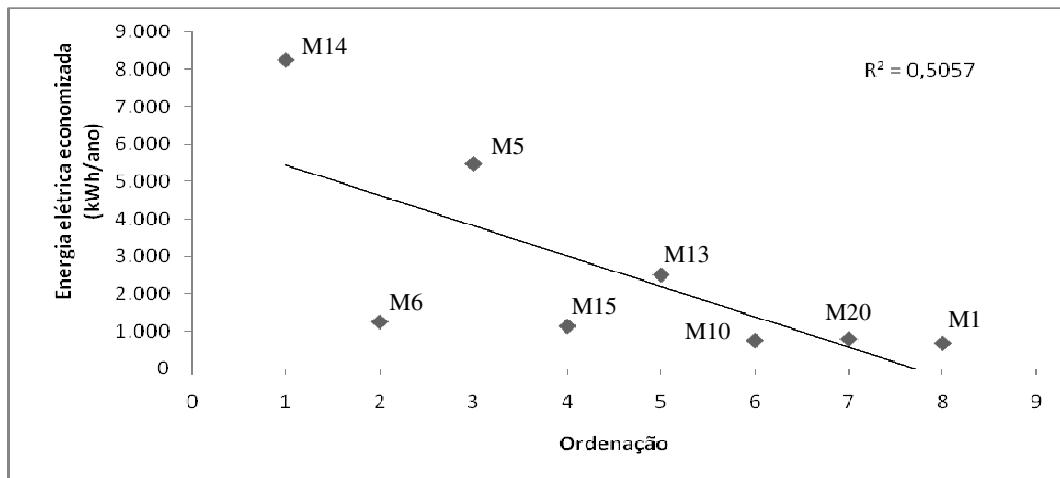


Figura 5.2 – Energia economizada em função da ordenação (elaboração do Autor)

É importante notar na Figura 5.2 que o primeiro motor na ordenação (M14) tem valor elevado de economia de energia, enquanto o segundo (M6) possui baixo valor. Certamente esse motor está nessa posição em função da preferência de outros critérios que não possuem relação com economia de energia, mas são importantes para a produção. O índice de

correlação não é muito elevado e isso se deve justamente à presença de múltiplos critérios, alguns conflitantes, outros com preferências similares e outros sem relação de preferência. Caso a correlação fosse alta, apenas o critério economia de energia seria necessário e suficiente para a ordenação. Por outro lado, se não houver correlação alguma com a economia de energia, isso pode indicar problemas na escolha dos critérios e a ordenação corre o risco de não interessar muito à empresa. Para garantir que critérios relevantes para a empresa sejam selecionados, cabe ao especialista em energia e ao analista em decisão a orientação quanto à escolha adequada dos critérios, cujo processo de decisão deve envolver todos os setores da empresa.

Uma das análises que a ferramenta GAIA permite é a importância da alternativa para um determinado critério. O Plano GAIA, com a quantidade de informação preservada $\delta=73,5\%$, é mostrado na Figura 5.3. O primeiro motor na ordenação é o M14, que no gráfico da Figura 5.2 apresenta alto valor de economia de energia e no plano GAIA (Figura 5.3) está na direção do critério Valor Presente Líquido. Isso indica que este é um critério importante para a economia de energia. Já o segundo motor (M6) está na direção dos critérios ‘Falhas por ano’ e ‘Rebobinamentos’, que não possuem relação de preferência com o Valor Presente Líquido, por isso apresentam baixo valor de economia de energia. Em síntese, o motor M6 é bom para os critérios ‘Falhas por ano’ e ‘Rebobinamentos’ enquanto o motor M14 é bom para o critério ‘Valor Presente Líquido’.

A análise GAIA também mostra a relação entre os critérios, considerando-os como vetores e analisando suas direções. Critérios que expressam preferências similares são orientados aproximadamente na mesma direção. Os critérios com preferências conflitantes são orientados em direções opostas. Se as direções entre os critérios são ortogonais não há relação em termos de preferências (Brans & Mareschal, 2005).

Na Figura 5.3, o eixo de decisão (entre o Valor Presente Líquido e Rebobinamentos, em vermelho) sendo curto indica fortes conflitos entre os critérios, segundo Brans & Mareschal (2005). Os critérios ‘Potência’ e “Valor Presente Líquido” conflitam com o critério ‘Carregamento’. Os critérios ‘Falhas por ano’, ‘Rebobinamentos’ e ‘Idade-anos em uso’, que apresentam preferências próximas, conflitam com o critério ‘importância para a produção’, mas não possuem relação em termos de preferências com os critérios ‘Carregamento’ e ‘Valor Presente Líquido’.

Quando os parâmetros são estabelecidos, certo nível de incerteza está presente. Assim, a análise de sensibilidade é importante e é aplicada para determinar como a solução se comporta quando os parâmetros estimados mudam (Wolters & Mareschal, 1995). Após a ordenação das tecnologias foi feita a análise de sensibilidade do modelo, com variação dos pesos dos critérios. A análise mostrou que, para 5% de variação dos pesos não houve inversões no ranking. Para 10%, 15% e 20% de variação houve apenas uma inversão até a 8^a posição. Como o resultado não interfere na priorização e, considerando também que a análise de sensibilidade é mais rigorosa na ordenação que na problemática da escolha, a solução é aceitável, pois apresenta baixa variabilidade, portanto, é robusta.

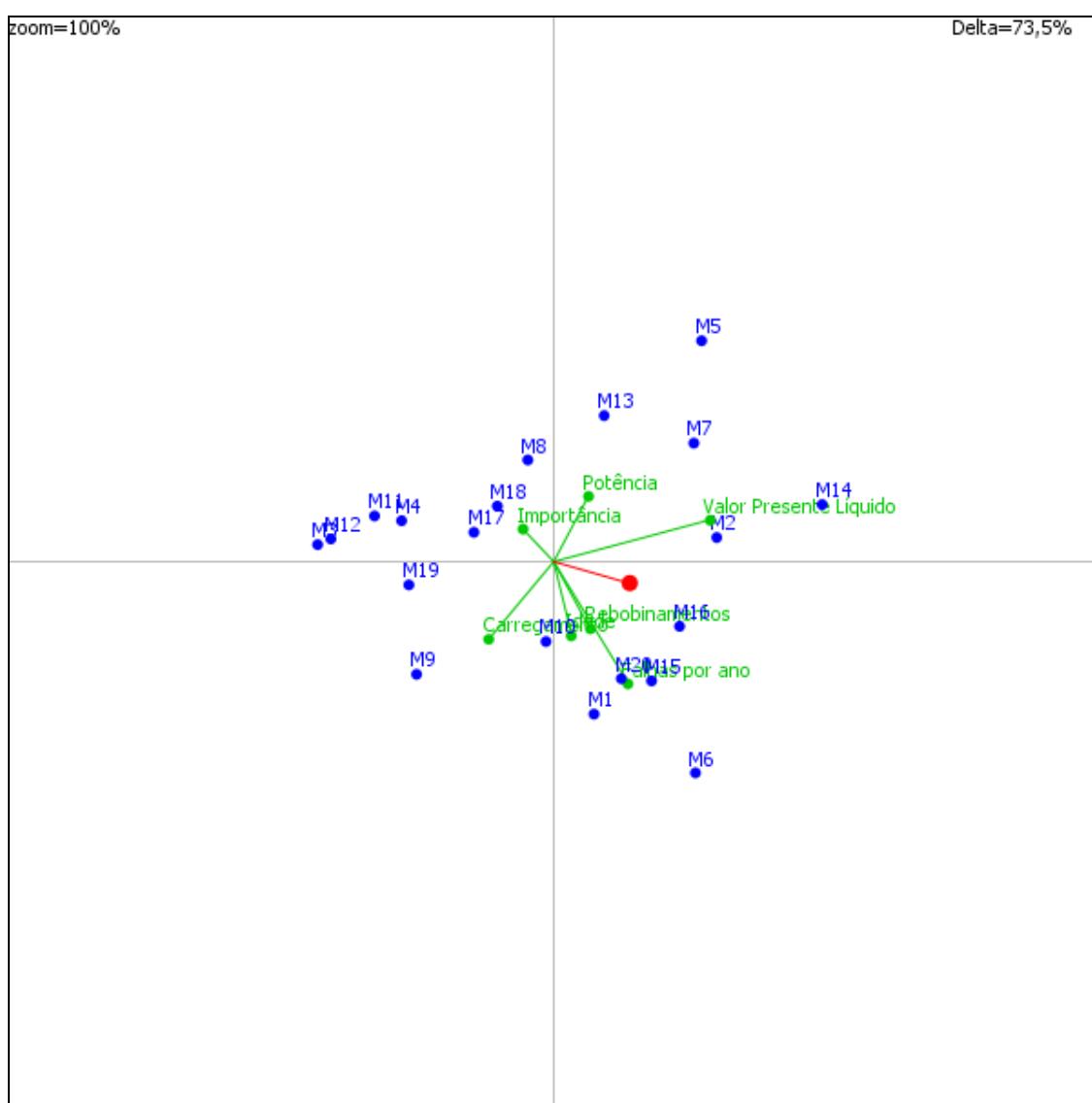


Figura 5.3 – Plano Gaia (software D-Sight)

5.5.2 Análise da situação II

O modelo tem como proposta a melhoria da eficiência energética pela substituição de tecnologias. Considerando os oito motores priorizados, a eficiência energética média por motor operando na indústria é de 84% e o melhor mix de portfólios tem uma eficiência média de 88,8% (dados extraídos da Tabela 5.3), uma melhoria de 5,4% na eficiência energética e, consequentemente, no consumo de energia. Esse valor é bem maior que os ganhos apresentados no estudo comparativo com a Lei da eficiência energética (1,3% a 2,5%), conforme Tabela 5.1. Essa melhoria na eficiência energética representa uma economia de energia elétrica em torno de 24,7 MWh/ano (Tabela 5.13). Como uma indústria pode ter dezenas ou centenas de motores e o sistema motriz é responsável pelo maior consumo e, considerando também os impactos da melhoria da qualidade e da confiabilidade na produção pelas novas tecnologias, o efeito é positivo.

O foco da empresa é o produto, por conseguinte, o sistema de produção. A literatura aponta nesse sentido e também ficou evidente na entrevista com o Diretor industrial feita no início dos trabalhos. O modelo preserva os interesses da empresa uma vez que são levadas em conta primeiramente as preocupações dos setores e depois as preferências do decisor. Uma análise mostra que podem ocorrer problemas com a priorização das tecnologias caso sejam consideradas apenas as preferências do decisor. Conforme pode ser observado na Tabela 5.12, a ordenação dos motores feita pelos setores no nível operacional não coincide com a ordenação feita com base nas utilidades do decisor. O segundo motor na ordenação pelo decisor é o oitavo motor na ordem dos setores. Isso indica um conflito entre o nível operacional e o nível de decisão, não um conflito de interesses, obviamente, mas um conflito de valores. Enquanto os valores do nível operacional são baseados na confiabilidade, qualidade, etc., os valores do decisor são fortemente ligados aos aspectos econômicos e financeiros, portanto conflitantes entre si.

De fato nem sempre se pode conciliar confiabilidade da tecnologia com baixo investimento e retorno financeiro rápido. Esse conflito entre o nível operacional e o nível de decisão evidencia que, se a seleção prévia fosse feita somente com base nos valores do Decisor desde o início do processo, motores importantes para a produção poderiam não ser priorizados para a troca. Isso mostra que o modelo estruturado em duas etapas de decisão é apropriado para preservar os valores de cada área e os interesses da organização como um todo.

Tabela 5.12 – Ordenação dos motores em cada nível

<i>Ranking</i>	Ordenação nível operacional	Ordenação decisor
1	M ₁	M ₁
2	M ₂	M ₈
3	M ₃	M ₆
4	M ₄	M ₂
5	M ₅	M ₇
6	M ₆	M ₄
7	M ₇	M ₅
8	M ₈	M ₃

Fonte: Elaboração do Autor

Após a maximização das utilidades nos portfólios foi realizada também uma análise de sensibilidade para verificar soluções próximas. Para fazer o teste de sensibilidade do portfólio com melhor *mix* de ações, a utilidade para cada motor da solução foi reduzida em 10% e as demais utilidades mantidas conforme a Tabela 5.11. A solução da nova programação linear é: M_{1D} - M_{2H} - M_{3C} - M_{4F} - M_{5D} - M_{6F} - M_{7F} - M_{8F}. Considerando também os motores apenas de um único portfólio (Tabela 5.11) a maior utilidade é do portfólio D, motores *Premium* com adequação à carga. O portfólio C substitui os antigos motores por eficiência *Premium* sem adequação à carga. Conforme a Tabela 5.13, é possível fazer um comparativo dos portfólios baseados nas utilidades do Decisor.

Tabela 5.13 – Comparativo entre portfólios com opções de tecnologias

Portfólio	<i>VIM</i> (R\$)	<i>VEE</i> (R\$)	<i>VPL</i> (R\$)	<i>TRS</i> (anos)	<i>QEE</i> (kWh/ano)
<i>MIX</i>	18.149	5.649	11.899	3,2	24.650
<i>MIX-10%</i>	19.178	5.487	10.634	3,5	22.681
<i>D</i>	20.913	5.998	11.669	3,5	25.147
<i>C</i>	24.590	5.226	6.428	4,7	21.924

Fonte: Cálculo do Autor

Analisando a Tabela 5.13, o portfólio *D* é superior apenas com relação à economia de energia, mas o portfólio com *MIX* de ações apresenta resultados melhores nos demais critérios, pois ele leva em conta as vantagens obtidas em outros portfólios. O portfólio *C* apresenta valores superiores aos estabelecidos pela empresa: orçamento máximo de R\$20 mil e tempo máximo de retorno de quatro anos. Isso mostra que o foco não deve ser somente as tecnologias com melhor eficiência do mercado, mas é importante considerar um conjunto de opções que permita ao decisor a maximização da sua utilidade.

Com relação ao portfólio *MIX-10%*, os motores M_{1D} - M_{4F} - M_{6F} - M_{7F} - M_{8F} têm utilidades próximas da solução e também podem ser avaliadas pelo Decisor. Essa análise é importante para que o Decisor tenha a percepção do desempenho do projeto no caso de critérios com valores muito próximos.

Dos oito motores priorizados, três possuem *TRS* até 1,5 anos, três com retorno entre dois e 2,8 anos. O *TRS* da solução (portfólio *MIX*) ficou com média maior que três anos por dois deles possuírem quatro anos ou mais de retorno. Entretanto, esses dois motores tiveram nota ‘10’ em importância para produção. Se o critério fosse apenas o *TRS* – adotado como critério de decisão por muitas empresas – os motores certamente não seriam selecionados.

5.6 Análise do capítulo

O capítulo apresentou a aplicação do modelo proposto em sistemas motrizes de uma indústria do ramo químico. Esse sistema industrial é o que normalmente consome mais eletricidade e possui grandes oportunidades de melhoria da eficiência energética. Para o projeto de substituição de motores visando à melhoria da eficiência energética foram identificados inicialmente, junto com o Decisor e com os setores, os interesses da empresa, que estão resumidos a seguir e comentados na sequência.

- Foco no produto e na produção;
- Compatibilizar custos com benefícios;
- Taxa de retorno de investimento de 12% ao ano;
- Tempo máximo de retorno de investimento de quatro anos;
- Limitação de orçamento para substituição de motores igual a R\$20 mil;
- Informação sobre uso eficiente de energia aos funcionários.

Inicialmente foi feita uma entrevista com um dos Diretores da empresa, que revelou aspectos importantes da organização. A empresa acredita que o uso racional de energia depende da conscientização de todos os funcionários. Outro ponto relevante é que, para que ações de eficiência energética sejam desenvolvidas na empresa é necessário ter como prioridade o produto. Dentre os obstáculos, o Diretor apontou a dificuldade de parar a fábrica e a dificuldade de integração entre o pessoal técnico e da produção. Não existem regras formais de decisão, mas o Diretor afirmou que, a partir da necessidade da produção, uma equipe de gerentes elabora um projeto para decisão final, sempre com foco no produto.

Conforme acordado com a Direção, foram feitas as seguintes reuniões: com os funcionários sobre o uso eficiente de energia; com os setores e a direção para definir, de forma consensual, os critérios, pesos, taxa de investimento, e demais parâmetros; com o Diretor, para identificar os demais parâmetros.

Foram utilizados vinte motores de indução maiores ou iguais a 5HP, todos trabalhando tempo integral. Os dados foram obtidos junto à planta industrial. No nível operacional o problema de decisão foi entendido por todos e a seleção dos critérios, bem como a definição dos pesos foi acessível a todos. Desse modo, o tempo de interação com os atores foi pequeno (uma reunião), considerando que a disponibilidade do pessoal e o tempo são fatores críticos nas empresas. A ordenação completa dos motores utilizou o método PROMETHEE II.

Foram obtidos com o Decisor os seguintes dados: valor máximo do orçamento para investimento em motores elétricos; o tempo de retorno de investimento; parâmetros relativos à utilidade. Para a decisão final foram considerados oito portfólios, totalizando 64 ações. Foi utilizado o método UTASTAR, com base nos princípios do MAUT, para determinar as utilidades do decisor. Uma programação linear foi aplicada para a maximização da utilidade nos portfólios, com objetivo de escolher o portfólio com o melhor *mix* de ações.

Com relação ao decisor, o mínimo de interação também é recomendável. A escolha dos critérios e dos demais parâmetros foi uma tarefa fácil para o decisor, uma vez que envolveu elementos financeiros, que são familiares ao decisor. Foi evitado um método de educação direta para determinação da utilidade do Decisor, para reduzir o tempo de interação e evitar possíveis erros. A tarefa complexa dos métodos multicritérios utilizados ficou por conta do Analista, não do pessoal da empresa.

A análise de sensibilidade mostrou baixa variabilidade da ordenação com a variação dos pesos dos critérios. A análise GAIA apontou alto grau de conflito entre os critérios. Com

relação ao perfil energético, o modelo mostrou certa correlação com a economia de energia, indicando que critérios importantes nesse sentido foram considerados.

O modelo também mostrou que a ordenação sob o ponto de vista operacional não coincide com a ordenação sob o ponto de vista gerencial, indicando conflito de valores. Isso reforça a importância de se considerar primeiro o nível operacional e depois o nível gerencial, para evitar a perda de foco na produção.

A aplicação do modelo na empresa contribuiu para identificar problemas de operação dos sistemas motrizes e também ligados ao processo de decisão para aquisição de tecnologias. Considerando a aplicação do modelo, a priorização foi feita com critérios importantes para a produção. Dentre os doze primeiros motores priorizados três possuem um ano de operação e um possui dois anos. Isso indica que a empresa adquire motores sem utilizar ferramentas de decisão ou mesmo sem considerar critérios importantes para os setores da empresa. A empresa opera com motores muito fora das condições nominais de carga.

Com relação à solução, dos oito motores indicados para a troca, seis devem ter a carga adequada, pois apresentam carregamento abaixo de 50%. Vários motores na empresa trabalham praticamente a vazio ou com carregamento abaixo de 30%. Esse comportamento da empresa reflete uma falta de informações sobre as consequências da operação dos sistemas motrizes nas perdas energéticas.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho de pesquisa propôs um modelo de decisão multicritério para substituição de tecnologias em sistemas industriais de energia visando à melhoria da eficiência energética. Uma revisão de literatura oportunizou a comparação entre o processo de decisão e o processo de modelagem energética e permitiu a identificação de lacunas, que foram incorporadas ao processo de modelagem energética. O modelo proposto foi aplicado em sistemas motrizes industriais e passou por uma análise de sensibilidade, onde ficou constatada a baixa variabilidade.

A seguir são apresentadas as contribuições do modelo proposto, comparações com outros modelos da literatura, limitações e recomendações e sugestões para trabalhos futuros.

6.1 Resultados e contribuições do modelo

O modelo proposto mostrou-se um mecanismo eficiente e eficaz, uma vez que os resultados esperados (seção 1.6) foram obtidos com a aplicação do modelo na indústria. Houve contribuição para a transposição de barreiras organizacionais no que diz respeito ao uso eficiente de energia. O desempenho com relação à energia foi satisfatório, uma vez que a economia de energia tem relação direta com ordenação das tecnologias segundo as preferências e a solução apresenta melhoria da eficiência energética acima dos percentuais apresentados pelo estudo de referência. Os interesses da empresa obtidos junto aos setores e ao decisor também foram contemplados. O processo de modelagem contou com a participação de todos os setores e foi realizado no tempo acordado com a empresa, sem prejuízo ao processo produtivo.

Uma das barreiras é com relação à informação, não só a falta, mas principalmente a assimetria. O modelo estabelece como condição essencial a participação e contribuição de todos os setores no processo, compartilhando as informações. Outro ponto é que o decisor não recebe apenas dados para decidir, como ocorre no caso do estudo de viabilidade tradicional, mas as informações são trabalhadas dentro de uma metodologia multicritério, orientando a decisão de acordo com os interesses da empresa.

Outra barreira para ações de eficiência energética é o foco da empresa na produção. O modelo considera essa situação, na medida em que inicia com o levantamento das necessidades e preocupações dos setores da empresa e depois as preferências do decisor.

Desse modo o modelo procura respeitar as características da empresa e também atender aos interesses, tanto da produção, em termos de confiabilidade, qualidade, etc., quanto do decisor, ligadas a custos, investimentos, etc. O modelo de decisão sendo formulado em duas etapas, considerando primeiramente o ponto de vista operacional e depois os pontos de vista do decisor, aproxima mais os resultados da realidade da empresa, levando em conta as preferências do decisor, mas sem perder o foco da produção. Isso pode contribuir para aumentar a probabilidade de adoção de projetos da área energética pelas empresas.

Com relação à falta de pessoal especializado na empresa, o Analista e o Especialista em energia enquanto agentes externos contribuem para a transposição desses obstáculos. A falta de ferramentas para tomada de decisão é suprida com a aplicação de métodos de apoio multicritérios pelo analista, adequados a cada um dos níveis da empresa – operacional e gerencial.

Falta de estratégias de longo prazo são consideradas barreiras para eficiência energética. As tecnologias priorizadas a partir do modelo proposto podem ser substituídas no médio e longo prazo, por meio de um planejamento estratégico, de acordo com as políticas e diretrizes da empresa.

São consideradas também as possíveis limitações financeiras da empresa. O alto custo inicial das tecnologias e o orçamento da empresa são barreiras para investimento em tecnologias energeticamente eficientes. Os diversos portfólios de opções analisados, incluindo vários tipos de tecnologias, preços, etc, possibilitam alternativas de custo, desempenho, adequando o orçamento da empresa para a substituição das tecnologias. O custo de uma auditoria energética geral na empresa é caro e o modelo contribui com sua flexibilidade, podendo ser aplicado a um sistema industrial de energia ou a vários.

Com relação ao sistema de gestão da empresa o modelo contempla todas as áreas, na medida em que envolve todos os setores no processo de decisão. A compatibilidade com o sistema de gestão de energia, cuja responsabilidade é monitorar constantemente o desempenho de energia e das tecnologias utilizadas no processo produtivo, é outra contribuição do modelo. Quando há oportunidade para a melhoria da eficiência energética nos sistemas industriais o modelo proposto responde com seus procedimentos e metodologias, dentro das etapas previstas. O modelo pode ser integrado dentro de um sistema de gestão de energia na empresa, uma vez que é compatível com os requisitos estabelecidos pela norma

NBR ISO 50001:2011, que prevê a modificação e renovação do consumo de energia de equipamentos, processos e dos sistemas industriais.

Considerando que a disponibilidade do pessoal e o tempo são fatores críticos nas empresas, o modelo se preocupou com a abordagem do analista para conseguir os resultados com o mínimo de interação com o decisor e demais atores. Para a aplicação do modelo apenas duas reuniões bastaram, uma com os setores com a participação da direção e outra com o Decisor. Os demais dados foram obtidos na planta industrial compatibilizando o tempo com a produção, operação e manutenção. Houve a preocupação de se buscar equilíbrio entre a complexidade do problema e a simplicidade da modelagem. O modelo foi ao mesmo tempo fiel às necessidades da empresa, mas sem se perder na complexidade do problema.

A inserção de informação sobre opções de eficiência energética, incertezas, riscos e aspectos comportamentais da empresa no modelo energético são pontos importantes que contribuem para a transposição de barreiras organizacionais na área energética. Preços e disponibilidade de energia, bem como de tecnologias são tratados no presente, porém, o modelo permite priorizar as tecnologias para serem substituídas aos poucos, seguindo o orçamento e um planejamento energético da empresa. Isso reduz as futuras incertezas de mercado. Os riscos para a produção ficam minimizados uma vez que o modelo considera as preocupações do nível operacional, envolvendo os diversos setores da empresa.

Os resultados também mostram um desempenho satisfatório com relação à melhoria da eficiência energética e a consequente economia de energia. O modelo é compatível com o conceito de eficiência energética. As tecnologias existentes são comparadas com as tecnologias energeticamente eficientes do mercado e as substituições são feitas preservando a qualidade e a confiabilidade da produção, com custos e retornos condizentes com o orçamento disponível e os interesses da empresa.

Com relação à área energética industrial, o modelo proposto apresenta inúmeras contribuições, conforme discutido anteriormente. Sob o ponto de vista da área de apoio à decisão multicritério, os benefícios são recíprocos. A área de decisão fica fortalecida ao dispor o seu conhecimento e ferramentas a serviço da área de energia, uma área relevante no contexto socioeconômico mundial. No caso dos métodos aditivos, por exemplo, o AHP tem tido uma enorme repercussão mundial, enquanto o MAUT, mesmo com toda sua consistência baseado na teoria da utilidade e nos seus axiomas, não tem encontrado o mesmo nível de

aplicação, devido à sua complexidade. Este trabalho oportunizou ao MAUT mostrar a sua eficácia de um modo menos complexo para o Decisor.

Outro aspecto importante é com relação ao processo de decisão estabelecido e duas fases. Um processo de apoio à decisão tradicional inicia com a educação das preferências do decisor. Neste trabalho de pesquisa o processo de decisão inicia com as preocupações e necessidades do pessoal envolvido na produção, no nível operacional da empresa, para depois identificar as preferências do decisor. Isso abre um precedente para que outros trabalhos utilizem o mesmo enfoque, em situações onde o decisor não tenha condições de estabelecer os parâmetros e dependa de outras áreas para resolver o problema, tornando-se uma contribuição importante do trabalho.

6.2 Comparações com outros modelos

O modelo multicritério proposto apresenta diferenças substanciais se comparado com os modelos encontrados na literatura, conforme segue:

- a) Os modelos que utilizam o método *MIND* são focados nos processos de produção e baseiam-se no conceito de otimização – minimização de custos, por exemplo. O modelo proposto tem a vantagem de ser flexível, podendo ser utilizado para substituição de tecnologia em qualquer sistema industrial de energia. Além disso, o modelo proposto permite conciliar os interesses de todos os setores da empresa e do Decisor.
- b) Os modelos com enfoque nas tecnologias ou nos energéticos são aplicados nos usos finais, utilizam métodos multicritérios, mas apresentam as seguintes diferenças:
 - O modelo que utiliza a combinação dos métodos *Fuzzy-PROMETHEE* e *ZOGP* é aplicável na seleção de tecnologias e trabalha com variáveis linguísticas, em situações subjetivas. O modelo proposto utiliza o método PROMETHEE para fazer a ordenação de tecnologias, mas sem incorporar elementos *fuzzy*, uma vez que os critérios são quantificáveis. Quanto à decisão final, o modelo proposto trabalha com valores que podem ser ordenados de forma monotônica, crescente ou decrescente, variando de um nível ‘pior’ para um nível ‘melhor’ em termos de preferência do decisor. Neste caso, a função utilidade é apropriada e gera resultados bastante consistentes, em função da sólida estrutura axiomática do MAUT.

- No caso do modelo que usa o método PROMETHEE II, o propósito é fazer seleção de energéticos, não de tecnologias. O modelo proposto faz ordenação de tecnologias, sob o ponto de vista do nível operacional, considerando as preocupações da produção, e também analisa portfólios de opções, baseado nas utilidades do decisor.
- O modelo que trabalha com o método ANP, classificado como função única de síntese, é aplicável para fazer um ranking de recursos energéticos – como eletricidade, carvão, óleo, etc. – em indústria de manufatura. O modelo proposto diverge não só com relação ao propósito, pois trabalha com substituição de tecnologias, mas também diverge com relação à metodologia aplicada.

6.3 Limitações e recomendações

O modelo proposto apresenta várias contribuições, mas depende de outros fatores internos na organização. O comprometimento da Alta Gerência e dos setores da empresa é crucial. É importante que a empresa seja conscientizada sobre a importância tanto da área de decisão como da área energética para os resultados da organização. O modelo contribui parcialmente para a melhoria da conscientização para eficiência energética. No caso dessa empresa específica, as informações sobre o uso eficiente de energia foram repassadas pelo Analista aos funcionários, por meio de palestra. Para que haja uma ampla conscientização é necessário um processo de informação e de educação, bem como práticas sistematizadas por meio de um Sistema de Gestão de Energia. O modelo proposto é parte desse sistema.

O baixo orçamento ou a falta é um fator crítico para a adoção de projetos, conforme apontam os resultados do estudo. É fundamental que a empresa tenha um orçamento adequado para a melhoria das tecnologias empregadas nos sistemas industriais de energia.

Os resultados das tecnologias priorizadas indicam falta de utilização de ferramentas de decisão. Isso ficou evidente também na entrevista com o Diretor, que citou o caso do gerador que está subutilizado em função de decisão equivocada e falta de visão de futuro. A falta de conhecimento dos impactos da operação das tecnologias sobre o consumo de energia e sobre os custos também é evidente. Isso mostra a importância da qualificação na área energética e a capacitação dos gestores para o uso de ferramentas eficientes de tomada de decisão.

É recomendável, a disseminação junto às indústrias do modelo de apoio à decisão multicritério aqui proposto, no sentido da melhoria da eficiência dos sistemas industriais de

energia, não só a eficiência energética, mas a eficiência operacional também. Existem importantes estratégias e políticas que podem ser direcionadas às organizações com relação ao uso eficiente de energia. Por exemplo, um analista de uma instituição (Universidade ou Empresa de Conservação de Energia – ESCO) com conhecimento na área de decisão e em energia ou em parceria com outros especialistas da área energética podem contribuir para a disseminação do modelo proposto.

Políticas governamentais, como preços e subsídios, obviamente continuam sendo medidas essenciais para adoção de tecnologias energeticamente eficientes pelas indústrias. Tais medidas, aliadas ao modelo de decisão proposto, certamente poderiam produzir bons efeitos e contribuiriam enormemente para a transposição de outras barreiras organizacionais.

6.4 Sugestões para trabalhos futuros

Algumas dificuldades foram encontradas por parte do Analista na aplicação do modelo, principalmente em relação ao tratamento dos dados para análise, em virtude da utilização de planilhas eletrônicas em algumas partes do trabalho. A elaboração de um programa de computador que une as metodologias aplicadas poderia simplificar o trabalho do analista e dar agilidade aos resultados.

Existem vários critérios ainda pouco explorados nas indústrias, como por exemplo, confiabilidade, tempo de vida remanescente das tecnologias, etc., que podem ser utilizados em novas aplicações do modelo. A aplicação do modelo nas indústrias é um ponto a ser explorado e pode fornecer subsídios para o aperfeiçoamento contínuo, em conformidade com os princípios estabelecidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR ISO 50001:2011 – Sistemas de Gestão de Energia – Requisitos com orientações para uso.* Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2011.
- ACKOFF, R. L.; SASIENI, M. W. *Pesquisa Operacional.* 1^a. ed. Tradução de José L. Moura e Cláudio G. Reis. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 523 p., 1971.
- AFGAN, N.H.; CARVALHO, M.G.; PILAVACHI, P.A.; MARTINS, N.. Evaluation of natural gas supply options for Southeast and Central Europe: Part 2. Multi-criteria assessment. *Energy Conversion and Management* 49, 2345–2353, 2008.
- ALBERTS, D.J. Stakeholders or subject matter experts, who should be consulted? *Energy Policy*, V. 35, pp.2336–2346, 2007.
- AL-KLOUB, B., AL-SHEMMERI, T., PEARMAN, A. The role of weights in multi-criteria decision aid, and the ranking of water projects in Jordan. *European Journal of Operational Research*, 99, 278-288, 1997.
- ALMEIDA, E.L.F. Energy efficiency and limits of market forces: the example of the electric motor market in France. *Energy Policy*, vol. 26, nº 8, pp. 643-653, 1998.
- ALMEIDA, A.T.; FERREIRA, F.J.T.E.; FONG, J.A.C. Standards for efficiency of electric motors. *IEEE Industry Applications Magazine*, pp. 12-19, Jan – Feb, 2011.
- ALQDAH, K. Potential opportunities for energy savings in a Jordanian poultry company. *Energy Conversion and Management*, 51, 1651–1655, 2010.
- ANDERSON, S.T.; NEWELL, R. Information programs for technology adoption: the case of energy-efficiency audits. *Resource and Energy Economics*, 26, 27–50, 2004.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. *Resolução n.º 456, de 29 de novembro de 2000 – Estabelece, de forma atualizada e consolidada, as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica.* Brasília: ANEEL, 2000.
- AUGIER, M.; TEECE, D.J. Dynamic Capabilities and the Role of Managers in Business Strategy and Economic Performance. *Organization Science*, Vol. 20, No. 2, March–April, pp. 410–421, 2009.

- BANA E COSTA, C. A; ENSSLIN, L; CORRÊA, E. C; VANSNICK, J.C. Decision Support Systems in action: Integrated application in a multicriteria decision aid process. *European Journal of Operational Research*, V. 113, pp. 315-335, 1999.
- BANSAL, P. From Issues to Actions: The Importance of Individual Concerns and Organizational Values in Responding to Natural Environmental Issues. *Organization Science*, 14, 5, 510–527, 2003.
- BARBERIS, G.M.F. *Robustness Analysis: A Powerful Tool in the Multiple Criteria Decision Making Field*. Newsletter of the European Working Group “Multicriteria Aid for Decisions”, Séries 3, nº 13, pp. 9-13, 2006.
- BECCALI, M., CELLURA, M., MISTRETTA, M. Decision-making in energy planning: Application of the Electre method at regional level for the diffusion of renewable energy technology. *Renewable Energy*, 28, 2063–2087, 2003.
- BEHZADIAN, M; KAZEMZADEH, R.B.; ALBADVI, A.; AGHDASI, M. PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *European Journal of Operational Research*, 200, 198–215, 2010.
- BELTON, V. & GOODWIN, P. Remarks on the application of the analytic hierarchy process to judgmental forecasting. *International Journal of Forecasting*, 12, 155-161, 1996.
- BELTON, V. & STEWART, T. *Multiple criteria decision analysis: an integrated approach*. Boston: Kluwer Academic Publications, 2002.
- BEUTHE, M. & SCANNELLA, GIUSEPPE. Comparative analysis of UTA multicriteria methods. *European Journal of Operational Research*, 130, 246-262, 2001.
- BEVILACQUA, M.; BRAGLIA, M.; FROSOLINI, M.; MONTANARI, R. Failure rate prediction with artificial neural networks. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 11, 279-294, 2005.
- BÖHRINGER, C.; Rutherford, T.F. Combining bottom-up and top-down. *Energy Economics*, 30, 574-596, 2008.
- BOND, S.D.; CARLSON, K.A.; KEENEY, R.L. Generating objectives: Can Decision Makers articulate what they want? *Management Science*, vol. 54, nº 1, January, pp. 56-70, 2008.

- BORGES, A.R.; ANTUNES, C.H. A fuzzy multiple objective decision support model for energy-economy planning. *European Journal of Operational Research*, 145 (2) 304–316, 2003.
- BRANS, J.P. & MARESCHAL, B. Promethee methods. In: Figueira, J., Greco, S., Ehrgott, M. (Eds.), *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. Springer Science and Business Media, Inc., cap. 5, pp. 163–196, 2005.
- BRASIL – Ministério das Minas e Energia. Eficiência Energética. In: *Plano Nacional de Energia 2030*. Brasília: MME/EPE, Vol. 11, 2007.
- BRITO, A.J.; ALMEIDA, A.T.; MOTA, C.M.M. A multicriteria model for risk sorting of natural gas pipelines based on ELECTRE TRI integrating Utility Theory. *European Journal of Operational Research*, 200, 812–821, 2010.
- CAVALCANTE, C.A.V.; ALMEIDA, A.T. A multi-criteria decision-aiding model using PROMETHEE III for preventive maintenance planning under uncertain conditions. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 13, 385-397, 2007.
- CAVALLARO, F. Multi-criteria decision aid to assess concentrated solar thermal technologies. *Renewable Energy*, 34, 1678–1685, 2009.
- CNI – Confederação Nacional das Indústrias. *Eficiência energética na indústria: o que foi feito no Brasil*. Brasília: CNI/COMPI, 2009.
- COPEL – Companhia Paranaense de Energia. *Balanço energético do Paraná 2009: Sumário executivo de 2008*. Curitiba, PR: COPEL, 2009.
- DAVIES, W. Understanding strategy. *Strategy & Leadership*, 28 (5), pp. 25-30, 2000.
- DECANIO, S.J. The efficiency paradox: bureaucratic and organizational barriers to profitable energy-saving investments. *Energy Policy*, 26, 5, 441-454, 1998.
- DEGROOT, H.L.F., VERHOEF, E.T., NIJKAMP, P. Energy saving by firms: decision-making, barriers and policies. *Energy Economics*, 23, 717-740, 2001.
- DEJOURS, C. Subjectivity, work and action. *Revista Produção*, 14 (3), 27–34, 2004.
- DIAKOULAKI, D. & KARANGELIS, F. Multi-criteria decision analysis and cost-benefit analysis of alternative scenarios for the power generation sector in Greece. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, 716–727, 2007.

- DIAS, R.A., MATTOS, C.R., BAlestieri, J.A.P. Energy education: breaking up the rational energy use barriers. *Energy Policy*, 32, 1339–1347, 2004.
- DIAS, L. C. & TSOUKIÀS, A. *On the constructive and other approaches in decision aiding*. In C. A. Hengeller, J. Figueira & J. Clímaco (Eds.), Proceedings of the 56th meeting of the EURO MCDA working group (pp. 13–28). Coimbra, October, 2004.
- DOE – Department Of Energy. *Energy use, loss and opportunities analysis*: U.S. Manufacturing & Mining. USA: DOE/ITP, 2004.
- DOE – U.S. Departament of Energy. *Improving motor and drive system performance: A sourcebook for industry*. Whashington, DC: DOE/GO-102008-2317, 2008.
- DOUKAS, H., PATLITZIANAS, K.D., PSARRAS, J. Supporting sustainable electricity technologies in Greece using MCDM. *Resources Policy*, 31, 129–136, 2006.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). *Balanço Energético Nacional 2010*: Ano base 2009. Rio de Janeiro: EPE, 2010.
- FIGUEIRA, J. & ROY, B. Determining the weights of criteria in the ELECTRE type methods with a revised Simos' procedure, *European Journal of Operational Research*, 139, 317–326, 2002.
- FLEITER, T.; WORRELL, E.; EICHHAMMER, W. Barriers to energy efficiency in industrial bottom-up energy demand models – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 3099-3111, 2011.
- GARCIA, AGP. *Impacto da Lei de eficiência energética para motores elétricos no potencial de conservação de energia na indústria*. Dissertação de Mestrado em Planejamento Energético. COPPE/UFRJ: Rio de Janeiro, 2003.
- GARCIA, A. G. P; SZKLO, A. S; SCHAEFFER, R; MCNEIL, M. A. Energy-efficiency standards for electric motors in Brazilian industry. *Energy Policy*, V. 35, pp. 3424–3439. 2007.
- GAVETTI, G. Cognition and Hierarchy: Rethinking the Microfoundations of Capability's Development. *Organizations Science*, Nov/Dec, 16, 6; ABI/INFORM Global, p. 599, 2005.
- GAVETTI, G & RIVKIN, J. W. On the Origin of Strategy: Action and Cognition over Time. *Organization Science*, Vol. 18, nº. 3, May–June, 420–439, 2007.

- GELLER, H; HARRINGTON, P; ROSENFELD, A. H; TANISHIMA, S; UNANDER, F. Polices for increasing energy efficiency: Thirty years of experience in OECD countries. *Energy Policy*, V. 34, pp. 556–573, 2006.
- GEORGOPOLOU, E., LALAS, D., PAPAGIANNAKIS, L. A Multicriteria Decision Aid approach for energy planning problems: The case of renewable energy option. *European Journal of Operational Research*, 103, 38-54, 1997.
- GHAFGHAZI , S.; SOWLATI, T.; SOKHANSANJ, S.; MELIN, S. A multicriteria approach to evaluate district heating system options. *Applied Energy* 87 (2010) 1134–1140.
- GOMES, L.F.A.M.; GOMES, C.F.S.; ALMEIDA, A.T. *Tomada de decisão gerencial: enfoque multicritério*. 2^a Ed. São Paulo: Atlas, 2006.
- GORDIC', D.; BABIC', M.; JOVICIC', N.; ŠUŠTERŠIC, V.; KONCALOVIC', D.; JELIC, D. Development of energy management system – Case study of Serbian car manufacturer. *Energy Conversion and Management*, 51, 2783–2790, 2010.
- GREENING, L. A. & BERNOW, S. Design of coordinated energy and environmental policies: use of multi-criteria decision-making. *Energy Policy*, 32, 721–735, 2004.
- GROBLER, L.J.; HEIJER, W.I.R.D. Measurement and verification of energy savings in industrial facilities. *Energy Engineering*, 107, 5, 24-41, 2010.
- HARALAMBOPOULOS, D.A. & POLATIDIS, H. Renewable energy projects: structuring a multicriteria group decision-making framework. *Renewable Energy*, 28, 961–973, 2003.
- HYDE, K., MAIER, H., COLBY, C. Incorporating uncertainty in the PROMETHEE MCDA method. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 12, 245–259, 2003.
- HU, Y. Implementation of voluntary agreements for energy efficiency in China. *Energy Policy*, 35, 5541–5548, 2007.
- IEA – International Energy Agency. *World Energy Outlook*. OECD/IEA, 2008.
- IEA – International Energy Agency. *Energy technology transitions for industry*. Paris, France: OECE/IEA, 2009.
- JACQUET-LAGREZE, E. & SISKOS, J. Assessing a set of additive utility functions for multicriteria decision-making, the UTA method. *European Journal of Operational Research* 10, 51-164, 1982.

- JEBARAJ, S., INIYAN, S. A review of energy models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10, 281–311, 2006.
- KABLAM, M.M. Decision support for energy conservation promotion: an analytic hierarchy process approach. *Energy Policy*, V. 32, pp.1151–1158, 2004.
- KANNAN, R.; BOIE, W. Energy management practices in SME – case study of a bakery in Germany. *Energy Conversion and Management*, 44, 945-959, 2003.
- KARLSSON, M. The MIND method: A decision support for optimization of industrial energy systems – Principles and case studies. *Applied Energy*, 88, 577–589, 2011.
- KEENEY, R. L. The Art of Assessing Multiattribute Utility Functions. *Organizational Behavior and Human Performance*, 19, 267-310, 1977.
- KEENEY, R. L. Making better Decision Makers. *Decision Analysis*, V. 01, nº 4, pp. 193-204, 2004.
- KEENEY, R. L., RAIFFA, H. *Decisions with multiple objectives: preferences and value tradeoffs*. New York, John Wiley, 1976.
- KEYSER, W., PEETERS, P. A note on the use of PROMETHEE multicriteria methods. *European Journal of Operational Research*, 89, 457-461, 1996.
- KISSOCK, J.K.; EGER, C. Measuring industrial energy savings. *Applied Energy*, 85, 347–361, 2008.
- KONIDARI, P.; MAVRAKIS, D. A multi-criteria evaluation method for climate change mitigation policy instruments. *Energy Policy*, V. 35, pp. 6235–6257, 2007.
- KOSOW, I.L. *Máquinas elétricas e Transformadores*. Globo, Rio de Janeiro, 1986.
- KRABUANRAT, K. & PHELPS, R. Heuristics and Rationality in Strategic Decision Making: An Exploratory Study. *Journal of Business Research*, V. 41, pp. 83-93, 1998.
- LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. *Fundamentos de Metodologia Científica*. 4^a ed. São Paulo: Atlas, 2001.
- LEE, SK.; TENG, MC.; FAN, KS.; YANG, KH; HORNG, R.S. Application of an energy management system in combination with FMCS to high energy consuming IT industries of Taiwan. *Energy Conversion and Management*, 52, 3060–3070, 2011.

- LEFLEY, F. The payback method of investment appraisal: A review and synthesis. *International Journal of Production Economics*, V. 44, pp. 207 -224, 1996.
- YINGJIAN, L.; JIEZHI, L.; QI, Q.; YAFEI, X. Energy auditing and energy conservation potential for glass works. *Applied Energy* 87, 2438–2446, 2010.
- LOKEN, E. Use of multicriteria decision analysis methods for energy planning problems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, V. 11, pp. 1584–1595, 2007.
- LUNG, R.B.; MCKANE, A.; OLSZEWSKI, M. Industrial Motor System Optimization Projects in the US: An Impact Study. *Energy Engineering*, 102 (1), 61-79, 2005.
- MARESCHAL, B., SMET, Y., NEMERY, P. *Rank Reversal in the PROMETHEE II Method: Some New Results*. Proceedings of the IEEE, 2008.
- MARINO, A.; BERTOLDI, P.; REZESSY, S.; BOZA-KISS, B. *Energy Service Companies Market in Europe*: Status Report 2010. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2010.
- MARQUES, M. C. S.; HADDAD, J. & MARTINS, A. R. S. *Conservação de energia: eficiência energética de equipamentos e instalações*. 3^a ed. Itajubá/MG: Eletrobrás, Procel Educação, Unifei, Fupai, 2006.
- MAZHAR, M.I.; KARA, S.; KAEBERNICK, H.,. Remaining life estimation of used components in consumer products: Life cycle data analysis by Weibull and artificial neural networks. *Journal of Operations Management*, 25, 1184–1193, 2007.
- MCCOY G A & DOUGLASS JG. *Energy Management for Motor Driven System*. Washington, USA: U.S. Department of Energy (DOE), March, 2000.
- MCKANE, A; PRICE, L; DE LA RUE DU CAN, S. *Policies for Promoting Industrial Energy Efficiency in Developing Countries and Transition Economies*. In: UNIDO – United Nations Industrial Development Organization Side Event on Sustainable Industrial Development on 8 May 2007 at the Commission for Sustainable Development (CSD-15). Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2007. Disponível: <https://www.unido.org/doc/65592>.
- MCWHINNEY, M.; FANARA, A.; CLARK, R.; HERSHBERG, C.; SCHMELTZ, R.; ROBERSON, J. Energy Star product specification development framework: using data and analysis to make program decisions. *Energy Policy*, 33, 1613–1625, 2005.

- MECROW, B.C., JACK, A.G. Efficiency trends in electric machines and drives. *Energy Policy*, 36, 4336–4341, 2008.
- MEIER, A.; OLOFSSON, T.; LAMBERTS, R. What is an Energy-Efficient Building? In: IX Encontro Nacional de Tecnologia do ambiente construído. *Anais*. Foz do Iguaçu, PR, 07 a 10 de maio de 2002.
- MINGERS, J. *Multimethodology – Mixing and Matching Methods*. In: ROSENHEAD J. AND MINGERS, J., ed. Rational analysis for a problematic world. Chichester, England: John Wiley & Sons, pp. 289-309, 2001.
- MINGERS, J. & ROSENHEAD J. Problem structuring methods in action. *European Journal of Operational Research*, V. 152, pp. 530-554, 2004.
- MME – Ministério das Minas e Energia. *Balanço de Energia Útil*. Brasília: MME/FDTE, 2005a.
- MME—Ministério das Minas e Energia. *Portaria Interministerial nº 553, de 8 de dezembro de 2005*. Estabelece MEPS para motores elétricos de indução trifásicos com rotor tipo gaiola de esquilo. Brasília, DF: MME, 2005b.
- NAGESHA, N. & BALACHANDRA, P. Barriers to energy efficiency in small industry clusters: multi-criteria-based prioritization using the analytic hierarchy process. *Energy*, V. 31, pp. 1969–1983, 2006.
- NEMA – National Electrical Manufacturers Association. Standards Publication nº MG10 2001: *Energy Management Guide for selection and use of induction motors*. Rosslyn/VA, EUA: NEMA, 2001.
- NEMA – National Electrical Manufacturers Association. Standards Publication nº MG1 2002. *Information Guide for General Purpose Industrial AC Small and Medium Squirrel-Cage Induction Motor Standards*. Washington, D.C., NEMA, 2002.
- NILSSON, K.; SÖDERSTRÖM, M. Optimizing the operation strategy of a pulp and paper mill using the MIND method. *Energy*, 17(10) pp. 945–53, 1992.
- OIKONOMOU, V.; BECCHIS, F.; STEG, L.; RUSSOLILLO, D. Energy saving and energy efficiency concepts for policy making. *Energy Policy*, 37, 4787-4796, 2009.

- OKAZAKI, T. & YAMAGUCHI, M. Accelerating the transfer and diffusion of energy saving technologies steel sector experience—Lessons learned. *Energy Policy*, 39, 1296–1304, 2011.
- ÖNÜT, S.; TUZKAYA, U. R.; SAADET, N. Multiple criteria evaluation of current energy resources for Turkish manufacturing industry. *Energy Conversion and Management*, 49, 1480–1492, 2008.
- PALM, J. & THOLLANDER, P. An interdisciplinary perspective on industrial energy efficiency. *Applied Energy*, 87, 3255–3261, 2010.
- PATLITZIANAS, K. D.; NTOTAS, K.; DOUKAS, H.; PSARRAS, J. Assessing the renewable energy producers' environment in EU accession member states. *Energy Conversion and Management*, 48, 890–897, 2007.
- PILAVACHIA, P.A.; ROUMPEAS, C.P.; MINETT, S.; AFGAN, N.H. Multi-criteria evaluation for CHP system options. *Energy Conversion and Management*, 47, 3519–3529, 2006.
- POHEKAR, S.D. & RAMACHANDRAN, M. Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, V. 8, pp. 365–381, 2004.
- RIVERS, N.; JACCARD, M. Useful models for simulating policies to induce technological change. *Energy Policy*, 34, 2038–2047, 2006.
- ROHDIN, P., THOLLANDER, P. Barriers to and driving forces for energy efficiency in the non-energy intensive manufacturing industry in Sweden. *Energy*, 31, 1836–1844, 2006.
- ROHDIN, P.; THOLLANDER, P.; SOLDING, P. Barriers to and drivers for energy efficiency in the Swedish foundry industry. *Energy Policy*, 35, 672–677, 2007.
- ROY, B. *Multicriteria for Decision Aiding*. London: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- RUSSEL, C. Strategic Industrial Energy Efficiency: Reduce Expenses, Build Revenues, and Control Risk. *Energy Engineering*, Vol. 102, nº. 3, pp. 7-27, 2005.
- SAATY, T.L. *The Analytic Hierarchy Process*. New York: McGraw-Hill, 1980.
- SAIDEL, M.A.; RAMOS, M.C.E.S.; ALVES, S.S. Assessment and optimization of induction electric motors aiming energy efficiency in industrial applications. In: *XIX International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, IEEE, Rome, 2010.

- SAIDUR, R. A review on electrical motors energy use and energy savings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 877–898, 2010.
- SAIDUR, R.; MEKHILEF, S. Energy use, energy savings and emission analysis in the Malaysian rubber producing industries. *Applied Energy*, 87, 2746–2758, 2010.
- SANDBERG, P. & SÖDERSTRÖM, M. Industrial energy efficiency: the need for investment decision support from a manager perspective. *Energy Policy*, 31, 1623-1634, 2003.
- SHARMA, A.; YADAVA, G.S.; DESHMUKH, S.G. A literature review and future perspectives on maintenance optimization. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 17 (1), 5-25, 2011.
- SILVA, R. D. S. Modelagem e simulação computacional de sistemas motrizes industriais. In: I Congresso Brasileiro de Eficiência Energética. Belo Horizonte, MG, Brasil, 12 a 14 de setembro de 2005. *Anais*. Associação Brasileira de Eficiência Energética – ABEE.
- SIMON, H.A. A behavioral model of rational choice. *The Quarterly Journal of Economics*, vol. 69, nº 1 (Feb), pp. 99-118, 1955.
- SISKOS, Y. GRIGOROUDIS, E.; MATSATSINIS, N.F. UTA Methods. In: *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art surveys*, pp. 297-334. New York: Springer, 2005.
- SISKOS, Y.; YANNACOPOULOS, D. UTASTAR: An ordinal regression method for building additive value functions. *Investigação Operacional*, 5 (1), 39–53, 1985.
- SOLA, A. V. H. & XAVIER, A. A. P. Organizational human factors as barriers to energy efficiency in electrical motors systems in industry. *Energy Policy*, V. 35, pp. 5784–5794, 2007.
- STENFORS, S; TANNER, L; SYRJANEN, M; SEPPALA, T; HAAPALINNA, I. Executive views concerning decision support tools. *European Journal of Operational Research*, V. 181, pp. 929–938, 2007.
- TANAKA, K. Assessment of energy efficiency performance measures in industry and their application for policy. *Energy Policy*, 36, 2887– 2902, 2008.
- THOLLANDER, P; DANESTIG, M; ROHDIN, P. Energy policies for increased industrial energy efficiency: Evaluation of a local energy program for manufacturing SMEs. *Energy Policy*, V. 35, pp. 5774–5783, 2007.

- THOLLANDER, P.; MARDAN, N.; KARLSSON, M. Optimization as investment decision support in a Swedish medium-sized iron foundry – A move beyond traditional energy auditing *Applied Energy*, 86, 433–440, 2009.
- TONN, B & MARTIN, M. Industrial energy efficiency decision making. *Energy Policy*, V. 28 pp. 831-843, 2000.
- TSOUKIÀS, A. On the concept of decision aiding process: an operational perspective. *Annals of Operations Research*, V. 154, pp. 3–27, 2007.
- TSOUKIÀS, A. From decision theory to decision aiding methodology. *European Journal of Operational Research*, 187, 138–161, 2008.
- TVERSKY, A.; KAHNEMAN, D. Judgment under Uncertainty: Heuristics and Biases. *Science*, Vol. 185, Nº. 4157. (Sep. 27), pp. 1124-1131, 1974.
- TZENG, G.H., SHIAU, T.A., LIN, C.Y. Application of multicriteria decision making to the evaluation of new energy system development in Taiwan. *Energy*, V. 17 (10), pp. 983–992, 1992.
- ÜLENGİN, F.; KABAK, Ö.; ÖNSEL, S.; ÜLENGİN, B.; AKTAS, E. A problem-structuring model for analyzing transportation–environment Relationships. *European Journal of Operational Research*, 200, 844–859, 2010.
- UN – United Nations. *Delivering on Energy*. New York: United Nations, 2010.
- VELDMAN, J.; KLINGENBERG, W.; WORTMANN, H. Managing condition-based maintenance technology. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 17(1) 40-62, 2011.
- VINCKE, PH. *Multicriteria Decision-Aid*. J. Wiley, New York, 1992.
- WANG, GH; WANG, YX & ZHAO, T. Analysis of interactions among the barriers to energy saving in China. *Energy Policy*, V. 36, pp. 1879–1889, 2008.
- WANG, JJ; JING, YY; ZHANG, CF; SHI, GH; ZHANG, XT. A fuzzy multi-criteria decision-making model for trigeneration system. *Energy Policy*, V. 36, pp. 3823–3832, 2009.
- WEBER, L. Viewpoint: Some reflections on barriers to the efficient use of energy. *Energy Policy*, Vol. 25, nº. 10, pp. 833-835, 1997.

- WEG – Electric Equipmments S.A. *Electric Motors*. Site: www.weg.net, Junho, 2011.
- WENSTOP, F & MYRMEL, A. Structuring organizational value statements. *Management Research News*, Vol. 29, nº. 11, pp. 673-683, 2006.
- WOLTERS, W.T.M. & MARESCHAL B. Novel types of sensitivity analysis for additive MCDM methods. *European Journal of Operational Research*, 81, 281-290, 1995.
- WORRELL, E.; VAN BERKEL, R.; FENGQI, Z.; MENKE, C.; SCHAEFFER, R.; WILLIAMS, R. O. Technology transfer of energy efficient technologies in industry: a review of trends and policy issues. *Energy Policy*, 29, 29-43, 2001.
- WORRELL, E.; RAMESOHL, S.; BOYD, G. Advances in energy forecasting models based on engineering economics. *Annual Review of Environment Resources*, 29, 345–381, 2004.
- YANG, M. Energy efficiency improving opportunities in a large Chinese shoe-making enterprise. *Energy Policy*, 38, 452-462, 2010.
- YANTI, P.A.A.; MAHLIA, T.M.I. Considerations for the selection of an applicable energy efficiency test procedure for electric motors in Malaysia: Lessons for other developing countries. *Energy Policy*, 37, 3467–3474, 2009.
- YILMAZ, B.; DAGDEVIREN, M. A combined approach for equipment selection: F-PROMETHEE method and zero-one goal programming. *Expert Systems with Applications*, 38, 11641–11650, 2011.
- ZOGRAFAKIS, N; MENEGAKI, A. N; TSAGARAKIS, K. P. Effective education for energy efficiency. *Energy Policy*, V. 36, pp. 3226– 3232, 2008.

APÊNDICE 1 – Portfólios

Tabela A1.1 – Valores do Portfólio A

Motor	VIM	VEE	VPL	TRS
M _{1A}	4850	1240	2098	3,9
M _{2A}	1229	226	180	5,5
M _{3A}	6365	599	-1337	10,6
M _{4A}	1450	270	227	5,4
M _{5A}	3370	510	58	6,6
M _{6A}	1450	144	-275	10,1
M _{7A}	1060	97	-233	10,9
M _{8A}	1676	168	-315	10,0

Tabela A1.2 – Valores do Portfólio B

Motor	VIM	VEE	VPL	TRS
M _{1B}	6000	1368	1941	4,4
M _{2B}	557	279	783	2,0
M _{3B}	6365	599	-1337	10,6
M _{4B}	1081	270	443	4,0
M _{5B}	2370	229	-474	10,4
M _{6B}	557	439	1428	1,3
M _{7B}	557	234	610	2,4
M _{8B}	557	475	1570	1,2

Tabela A1.3 – Valores do Portfólio C

Motor	VIM	VEE	VPL	TRS
M _{1C}	5499	1946	4537	2,8
M _{2C}	1527	279	217	5,5
M _{3C}	7001	1334	1218	5,2
M _{4C}	1785	270	31	6,6
M _{5C}	4114	675	282	5,9
M _{6C}	1578	320	349	4,9
M _{7C}	1219	234	222	5,2
M _{8C}	1867	168	-428	11,2

Tabela A1.4 – Valores do Portfólio D

Motor	VIM	VEE	VPL	TRS
M _{1D}	6763	2073	4301	3,3
M _{2D}	699	381	1110	1,8
M _{3D}	7001	1334	1218	5,2
M _{4D}	1300	333	569	3,9
M _{5D}	2750	648	971	4,2
M _{6D}	800	439	1286	1,8
M _{7D}	800	279	643	2,9
M _{8D}	800	511	1571	1,6

Tabela A1.5 – Valores do Portfólio E

Motor	VIM	VEE	VPL	TRS
M _{1E}	4343	988	1397	4,4
M _{2E}	816	188	274	4,3
M _{3E}	5357	154	-2521	34,9
M _{4E}	1146	270	405	4,2
M _{5E}	2763	86	-1272	32
M _{6E}	1146	111	-231	10,4
M _{7E}	836	97	-101	8,6
M _{8E}	1324	67	-506	19,6

Tabela A1.6 – Valores do Portfólio F

Motor	VIM	VEE	VPL	TRS
M _{1F}	5135	988	935	5,2
M _{2F}	422	135	292	3,1
M _{3F}	5357	154	-2521	34,9
M _{4F}	699	178	301	3,9
M _{5F}	2338	229	-455	10,2
M _{6F}	516	361	1134	1,4
M _{7F}	516	190	455	2,7
M _{8F}	516	419	1368	1,2

Tabela A1.7 – Valores do Portfólio G

Motor	VIM	VEE	VPL	TRS
M _{1G}	4241	990	1464	4,3
M _{2G}	1029	267	462	3,9
M _{3G}	5217	154	-2438	33,9
M _{4G}	1214	161	-70	7,5
M _{5G}	2999	200	-956	15,0
M _{6G}	1211	202	94	5,9
M _{7G}	795	246	515	3,2
M _{8G}	1400	221	58	6,4

Tabela A1.8 – Valores do Portfólio H

Motor	VIM	VEE	VPL	TRS
M _{1H}	5000	988	1014	5,1
M _{2H}	417	284	886	1,5
M _{3H}	5217	154	-2438	33,9
M _{4H}	811	289	679	2,8
M _{5H}	2100	86	-884	24,3
M _{6H}	510	277	805	1,8
M _{7H}	510	34	-164	15,2
M _{8H}	510	265	759	1,9

Tabela A1.9 – Utilidades do Portfólio A

Motor	VIM	VEE	VPL	TRS
M _{1A}	0,0048	0,0351	0,0392	0,0063
M _{2A}	0,0616	0,0000	0,0056	0,0000
M _{3A}	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
M _{4A}	0,0458	0,0000	0,0071	0,0032
M _{5A}	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
M _{6A}	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
M _{7A}	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
M _{8A}	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Tabela A1.10 – Utilidades do Portfólio B

Motor	VIM	VEE	VPL	TRS
M _{1B}	0,0027	0,0351	0,0331	0,0063
M _{2B}	0,1097	0,0000	0,0243	0,0000
M _{3B}	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
M _{4B}	0,0722	0,0000	0,0138	0,0063
M _{5B}	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
M _{6B}	0,1097	0,0020	0,0282	0,1928
M _{7B}	0,1097	0,0000	0,0189	0,0063
M _{8B}	0,1097	0,0051	0,0282	0,2097

Tabela A1.11 – Utilidades do Portfólio C

Motor	VIM	VEE	VPL	TRS
M _{1C}	0,0038	0,0971	0,2728	0,0063
M _{2C}	0,0403	0,0000	0,0067	0,0000
M _{3C}	0,0000	0,0351	0,0282	0,0042
M _{4C}	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
M _{5C}	0,0094	0,0220	0,0088	0,0000
M _{6C}	0,0367	0,0000	0,0108	0,0058
M _{7C}	0,0623	0,0000	0,0069	0,0042
M _{8C}	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Tabela A1.12 – Utilidades do Portfólio D

Motor	VIM	VEE	VPL	TRS
M _{1D}	0,0007	0,1246	0,2183	0,0000
M _{2D}	0,0995	0,0000	0,0282	0,1080
M _{3D}	0,0000	0,0351	0,0282	0,0042
M _{4D}	0,0566	0,0000	0,0177	0,0063
M _{5D}	0,0253	0,0197	0,0282	0,0063
M _{6D}	0,0923	0,0020	0,0282	0,1080
M _{7D}	0,0923	0,0000	0,0200	0,0063
M _{8D}	0,0923	0,0081	0,0282	0,1419

Tabela A1.13 – Utilidades do Portfólio E

Motor	VIM	VEE	VPL	TRS
M _{1E}	0,0060	0,0351	0,0282	0,0000
M _{2E}	0,0912	0,0000	0,0085	0,0000
M _{3E}	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
M _{4E}	0,0676	0,0000	0,0126	0,0063
M _{5E}	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
M _{6E}	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
M _{7E}	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
M _{8E}	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Tabela A1.14 – Utilidades do Portfólio F

Motor	VIM	VEE	VPL	TRS
M _{1F}	0,0044	0,0351	0,0282	0,0000
M _{2F}	0,1193	0,0000	0,0091	0,0152
M _{3F}	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
M _{4F}	0,0995	0,0000	0,0093	0,0063
M _{5F}	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
M _{6F}	0,1126	0,0000	0,0282	0,1758
M _{7F}	0,1126	0,0000	0,0141	0,0063
M _{8F}	0,1126	0,0003	0,0282	0,2097

Tabela A1.15 – Utilidades do Portfólio G

Motor	VIM	VEE	VPL	TRS
M _{1G}	0,0075	0,0351	0,0282	0,0000
M _{2G}	0,0759	0,0000	0,0143	0,0063
M _{3G}	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
M _{4G}	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
M _{5G}	0,0253	0,0000	0,0000	0,0000
M _{6G}	0,0629	0,0000	0,0029	0,0000
M _{7G}	0,0927	0,0000	0,0160	0,0000
M _{8G}	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Tabela A1.16 – Utilidades do Portfólio H

Motor	VIM	VEE	VPL	TRS
M _{1H}	0,0046	0,0351	0,0282	0,0047
M _{2H}	0,1197	0,0000	0,0275	0,1589
M _{3H}	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
M _{4H}	0,0915	0,0000	0,0211	0,0063
M _{5H}	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
M _{6H}	0,1130	0,0000	0,0250	0,1080
M _{7H}	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
M _{8H}	0,1130	0,0000	0,0236	0,0000

APÊNDICE 2 – Telas do software D-sight

As figuras mostram telas do software *D-sight* que faz a aplicação do método PROMETHEE. A primeira tela (superior) mostra os parâmetros e o gráfico com os critérios ordenados conforme os pesos. A segunda tela (inferior) mostra os dados a partir da matriz de avaliação (à esquerda da tela) e a ordenação completa dos motores (à direita).

