

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO

Roberto André Pressi

TOMADA DE DECISÃO DE INVESTIMENTO
ATRAVÉS DE MÉTODO MULTICRITÉRIO PARA FINS
DE PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DA
DISTRIBUIÇÃO

Porto Alegre

2017

Roberto André Pressi

**TOMADA DE DECISÃO DE INVESTIMENTO ATRAVÉS DE MÉTODO MULTICRITÉRIO PARA FINS
DE PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DA DISTRIBUIÇÃO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação Mestrado Profissional em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, modalidade Profissional, na área de concentração em Sistemas de Produção.

Orientador: Flávio Sanson Fogliatto, *Ph.D.*

Porto Alegre

2017

Roberto André Pressi

**TOMADA DE DECISÃO DE INVESTIMENTO ATRAVÉS DE MÉTODO MULTICRITÉRIO PARA FINS
DE PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DA DISTRIBUIÇÃO**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção na modalidade Profissional e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação Mestrado Profissional em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Flávio Sanson Fogliatto, *Ph.D.*

Orientador PPGEP / UFRGS

Prof. Ricardo Augusto Cassel, *Ph.D.*

Coordenador PMPEP/UFRGS

Banca Examinadora:

Professora Camila Dutra, Dr. (PMPEP /UFRGS)

Professor Ricardo Cassel, *Ph.D.* (PMPEP /UFRGS)

Professor Jonatas Ost, Dr. (PPGEP /UFRGS)

PRESSI, Roberto André. **Tomada de decisão de investimento através de método multicritério para fins de planejamento da expansão da distribuição**, 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

RESUMO

O planejamento da expansão do sistema elétrico é uma das principais atividades em uma distribuidora de energia elétrica, representando uma grande parcela dos investimentos realizados pelas distribuidoras para atender a demanda dos consumidores e os critérios estabelecidos pela agência reguladora (ANEEL). As empresas buscam o apoio de métodos multicritério no processo decisório de investimento, para otimizar e priorizar, com o intuito de obterem êxito na elaboração de um plano de obras que contemple aspectos técnicos e econômicos. A revisão sistêmica da literatura foi realizada em trabalhos de relevância para o tema em estudo, com auxílio de cinco bases de dados. O referencial teórico, que totaliza 52 publicações, apresenta conceitos teóricos sobre o processo decisório através de métodos multicritério de apoio à decisão, bem como exemplifica, através de aplicações práticas como os métodos estão sendo utilizados na área de energia. Com base nesta revisão foi possível estruturar a aplicação da Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT) em um processo decisório de investimento para fins de planejamento da expansão do sistema de distribuição em uma concessionária distribuidora de energia elétrica. Com a aplicação do método fica evidenciada a importância de um procedimento formal para auxiliar os decisores na hierarquização de forma objetiva dos alimentadores de energia elétrica mais críticos, proporcionando maior clareza e aprendizado em todo o processo de planejamento da expansão do sistema elétrico. Ao final, desenvolveu-se uma ferramenta para tratamento do grande volume de dados, que disponibiliza as informações depuradas para auxiliar na tomada decisão de investimento em ações eficientes, que melhorem a qualidade do fornecimento e atendam o crescimento do sistema. A partir da revisão bibliográfica e com a aplicação do método, oportunidades para estudos futuros foram identificadas.

Palavras-chave: métodos multicritério de apoio à decisão, MAUT, ferramenta de apoio à decisão, planejamento da expansão da distribuição

PRESSI, Roberto André. **Investment decision making through multicriterary method for the purpose of distribution expansion planning**, 2017. Dissertation (Master in Engineering) - Federal University of Rio Grande do Sul, Brazil.

ABSTRACT

The expansion planning of the electric system is one of the main activities in an electric energy distributor, representing a large part of the investments made by the distributors to meet the consumer demand and the criteria established by the regulatory agency (ANEEL). The companies seek the support of multi-criteria methods in the investment decision-making process, to optimize and prioritize, in order to succeed in the elaboration of a work plan which contemplates technical and economic aspects. The systemic review of the literature was carried out in current and relevant articles for the subject under study, with the aid of five database sources. The theoretical reference, which totals 52 publications, presents theoretical concepts on the decision process through multicriteria methods of decision support, as well as exemplifies through practical applications how the methods are have been used in the area of energy. Based on this review, it was possible to structure the application of the Multiattribute Utility Theory (MAUT) in an investment decision process for the purpose of planning the expansion of the distribution system in an electric power distribution concessionaire. The application of the method shows the importance of a formal procedure to assist decision makers in the objective hierarchy of the most critical electric power feeders, providing greater clarity and learning throughout the planning process of the expansion of the electric system. In the end, a tool was developed to treat the large volume of data, which provides the purified information to assist in the decision making of investment in assertive actions that improve the quality of supply and meet growth of the system. From the literature review and with the application of the method, opportunities for future studies have been identified.

Keywords: multicriteria decision, MAUT, decision support tool, distribution expansion planning

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Resultados da seleção dos artigos e trabalhos para a revisão bibliográfica.....	18
Figura 2: Representação da estrutura hierárquica.....	24
Figura 3: Matriz de Comparações Pareadas	25
Figura 4: Valor utilidade dos 15 primeiros alimentadores	60
Figura 5: Tela da plataforma do <i>Visual Basic for Applications</i> (VBA)	62
Figura 6: Tela inicial da ferramenta de priorização.....	62
Figura 7: Tela para entrada das notas dos critérios	63
Figura 8: Tela para visualização e edição das notas dos critérios e subcritérios.....	63
Figura 9: Menu da ferramenta para carregar os dados dos alimentadores	64
Figura 10: Hierarquização de alimentadores do sistema de distribuição para fins de planejamento.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características dos paradigmas racionalista e construtivista.....	22
Tabela 2: Escala Fundamental de Saaty	25
Tabela 3: Características dos principais métodos da família ELECTRE	31
Tabela 4: Comparativo entre os métodos de apoio à decisão.....	35
Tabela 5: Especialistas convidados	52
Tabela 6: Notas atribuídas pelos especialistas nos critérios e subcritérios	54
Tabela 7: Notas atribuídas pelos especialistas aos subcritérios do carregamento.....	55
Tabela 8: Notas atribuídas pelos especialistas aos subcritérios de queda de tensão	55
Tabela 9: Notas atribuídas pelos especialistas aos subcritérios de quantidade de clientes	55
Tabela 10: Notas atribuídas pelos especialistas aos subcritérios de performance.....	56
Tabela 11: Peso dos critérios.....	56
Tabela 12: Peso dos subcritérios de carregamento.....	56
Tabela 13: Peso dos subcritérios de queda de tensão	57
Tabela 14: Peso dos subcritérios de quantidade de clientes	57
Tabela 15: Peso dos subcritérios de performance	57
Tabela 16: Sistemas consultados para obter inputs de critérios e subcritérios do planejamento do sistema de distribuição de média tensão.....	58
Tabela 17: Hierarquização dos 30 alimentadores com maior valor utilidade	59

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Considerações Iniciais	10
1.2	Tema e Objetivos	11
1.3	Justificativa do Tema e dos Objetivos.....	11
1.4	Procedimentos Metodológicos	12
1.5	Estrutura da Dissertação.....	12
1.6	Delimitações do Estudo	13
1.7	Referências	13
2	PRIMEIRO ARTIGO: TOMADA DE DECISÃO DE INVESTIMENTO ATRAVÉS DE MÉTODO MULTICRITÉRIO PARA FINS DE PLANEJAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO: ANÁLISE DE ESTUDOS EMPÍRICOS.....	15
2.1	Introdução	15
2.2	Metodologia	17
2.3	Processo Decisório Através de Métodos Multicritério de Apoio à Decisão	19
2.3.1	<i>Analytic Hierarchy Process</i> – AHP.....	24
2.3.2	Teoria da Utilidade Multiatributo – MAUT	27
2.3.3	<i>Elimination et Choix Traduisant la Réalité</i> – ELECTRE	30
2.4	Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	34
2.5	Referências	36
3	SEGUNDO ARTIGO: TOMADA DE DECISÃO DE INVESTIMENTO ATRAVÉS DE MÉTODO MULTICRITÉRIO PARA FINS DE PLANEJAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO: PROPOSTA METODOLÓGICA E ESTUDO DE CASO	43
3.1	Introdução	43
3.2	Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição Apoiado em Método Multicritério	45
3.2.1	O método MAUT	47
3.3	Estudo de caso	50
3.4	Ferramenta	61
3.5	Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	65
3.6	Referências	67
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
4.1	Conclusões	71
4.2	Sugestões para trabalhos futuros	72

4.3	Referências	72
	APÊNDICE	74

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

A eletricidade representa um incremento na qualidade de vida da sociedade. A partir do momento em que esta se insere em uma determinada região, os benefícios notados pela população local são diversos, como melhores condições nas residências e maiores possibilidades de emprego e produção (KNAK, 2012).

Desta forma, a discussão sobre a expansão deste produto (energia elétrica) é pertinente e cada vez mais presente nos diversos eventos idealizados para debater o tema. Entretanto os estudos de expansão do sistema estão sempre atrelados a requisitos importantes de qualidade deste produto. A qualidade da energia, em uma análise inicial, é determinada pela sua disponibilidade, continuidade do fornecimento e níveis de tensão entregues ao consumidor final (LUSVARGHI, 2010).

A partir da década de 1990, intensificou-se a reestruturação do setor elétrico brasileiro. Um dos objetivos desta reestruturação foi aumentar a eficiência das atividades de distribuição e transmissão. A eficiência passou a ser foco das concessionárias distribuidoras de energia elétrica, que buscaram meios de garantir a viabilidade econômica da expansão do sistema elétrico, aumentando a qualidade, ao menor custo possível (LUCINI, 2010).

O planejamento da expansão do sistema elétrico é uma das principais atividades do setor, representando uma grande parcela dos investimentos realizados pelas distribuidoras de energia elétrica. Estabelecer de forma eficiente onde serão alocados os recursos, muitas vezes escassos, é um exercício indispensável para alcançar os objetivos estratégicos das empresas, principalmente no que diz respeito aos investimentos de médio e grande porte, visando soluções eficazes de curto, médio e longo prazo para o sistema de potência (COSSI, 2008).

Nesse aspecto, algumas empresas buscam o apoio de métodos multicritério no processo decisório de investimento, para otimizar e priorizar, com o intuito de obterem êxito na elaboração de um plano de obras que contemple aspectos técnicos e econômicos. Os critérios a serem considerados para a construção de um modelo otimizado são de diversas ordens e podem variar de acordo com a característica dos sistemas elétricos envolvidos (FERRET, 2012).

Conforme Gomes, Gomes e Almeida (2002), a tomada de decisão multicritério faz parte do cotidiano de uma distribuidora de energia elétrica, sendo uma atividade complexa e com objetivos conflitantes entre si. Cada vez mais é necessário ser eficaz na alocação dos

recursos financeiros para garantir a expansão do sistema, minimizando gargalos e com isso, não comprometer economicamente os clientes e as regiões atendidas (SONCINI, 2008).

Assim, a definição da alocação de investimento de uma empresa no setor elétrico deve ser realizada de forma consistente com objetivos e indicadores regulados pela ANEEL. Isso porque, caso a empresa não tenha claro se o investimento alocado nos projetos irá contribuir para os indicadores de qualidade do produto e serviço, no processo de revisão tarifária a ANEEL pode reduzir o lucro da empresa (CAMANHO; MORAES; MORANO, 2013).

1.2 Tema e Objetivos

O tema desta dissertação é a integração de método multicritério de apoio à decisão em umas das etapas do processo decisório de investimentos para fins de planejamento da expansão do sistema de média tensão.

O objetivo principal é: *(i)* transformar uma aplicação do MAUT em uma ferramenta prática. Os objetivos específicos são: *(i)* efetuar uma revisão bibliográfica sobre o processo decisório na tomada de decisão em investimento e principais métodos de apoio à decisão multicritério utilizados em priorização de investimentos em energia elétrica, em trabalhos de relevância para o tema em estudo; *(ii)* aplicação de método multicritério de apoio à decisão no processo decisório de investimento, para fins de planejamento da expansão do sistema de média tensão; e *(iii)* desenvolver ferramenta para tratamento de grande quantidade de dados e realizar aplicação de método multicritério no apoio à decisão das prioridades na expansão do sistema de média tensão.

1.3 Justificativa do Tema e dos Objetivos

A justificativa para o tema proposto é a necessidade e importância da eficiente alocação de recursos em investimentos por todas as distribuidoras de energia elétrica do Brasil; sendo assim, estas necessitam definir as prioridades no planejamento expansão do sistema de média tensão, devido aos limitados recursos disponíveis e risco de não ter investimento reconhecido na tarifa pelo órgão regulador (ANEEL).

Um planejamento adequado das redes de distribuição, no que diz respeito a sua expansão, deve ser realizado de forma a encontrar a melhor relação entre os investimentos previstos com a construção e melhoria destas redes e os ganhos obtidos nos níveis de tensão, no carregamento dos alimentadores relacionados e nos indicadores de qualidade, de maneira a melhorar a confiabilidade das redes e qualidade da energia, assim como o número de consumidores beneficiados com tais benfeitorias (PINTO, 2008).

Este trabalho traz uma contribuição importante para o estado da arte sobre métodos multicritério de apoio à decisão na área de energia elétrica. Neste trabalho, propõem-se a utilização do MAUT (*Multi-Attribute Utility Theory* ou Teoria da Utilidade Multicritério), um método de decisão multicriterial, para definir a atribuição da função utilidade de cada alimentador do sistema de média tensão de uma concessionária de energia elétrica, objeto de estudo.

O MAUT foi escolhido para este trabalho, pois permite a avaliação de vários critérios e alternativas simultaneamente, sem a necessidade de comparações pareadas de parâmetros ou atributos, além de contemplar todas as necessidades de avaliação do projeto apresentado como estudo de caso no trabalho.

1.4 Procedimentos Metodológicos

No presente trabalho, o método de pesquisa é classificado sob o ponto de vista de sua natureza, abordagem do problema, objetivos e procedimentos técnicos. Esta pesquisa é classificada como aplicada, já que é direcionada para uma aplicação prática que busca solucionar um problema específico (BOAVENTURA, 2004). A forma de abordagem é qualitativa e quantitativa, pois visa quantificar os resultados obtidos e interpretar os cenários estudados considerando situações reais de trabalho. Quanto aos objetivos, trata-se de uma pesquisa exploratória, que pretende identificar as variáveis que contribuem para a ocorrência de eventos. Os procedimentos são caracterizados como experimentais, uma vez que determina-se um objeto de estudo e realizam-se intervenções para avaliar o seu resultado (GIL, 1991).

1.5 Estrutura da Dissertação

A dissertação está organizada em quatro capítulos. O primeiro capítulo introduz o trabalho, apresentando o tema, os objetivos, justificativas e os procedimentos metodológicos adotados. Também são apresentadas as delimitações do estudo e a estrutura do trabalho.

O segundo capítulo traz o primeiro artigo, que apresenta uma revisão da literatura sobre o estudo do processo decisório através de métodos multicritérios de apoio à decisão para utilização em priorização de investimentos em energia elétrica, em trabalhos de relevância para o tema em estudo. Além de apresentar conceitos teóricos, este capítulo apresenta os aspectos principais de quatro métodos, aplicações realizadas no setor de energia e quadro comparativo dos métodos.

O terceiro capítulo é composto pelo segundo artigo, onde é apresentada a aplicação do método MAUT em um processo decisório de investimento para fins de planejamento da expansão do sistema de média tensão em uma concessionária distribuidora de energia elétrica. O capítulo, além de detalhar o método proposto, ilustra a sua aplicação através de um estudo de caso e apresenta uma ferramenta computacional de apoio.

O quarto capítulo apresenta a conclusão do trabalho, onde os resultados obtidos são analisados em acordo com os objetivos desejados e as delimitações do estudo. Esse capítulo também apresenta sugestões para desenvolvimentos futuros.

1.6 Delimitações do Estudo

Este trabalho limita-se a aplicação do método multicritério de apoio à decisão de investimentos para fins de planejamento da expansão do sistema de média tensão. Por este motivo, não é contemplado no trabalho o sistema de alta tensão, bem como outros processos de uma concessionária distribuidora de energia elétrica.

Será contemplada na análise a hierarquização dos alimentadores mais críticos do sistema de distribuição da empresa estudada; portanto, os critérios e dados definidos e utilizados neste trabalho tem origem na empresa distribuidora de energia estudada.

A hierarquização originada neste trabalho será analisada do ponto de vista técnico da criticidade do sistema. Não serão avaliadas neste estudo as ações necessárias para melhorar as condições atuais dos alimentadores, bem como análise financeira e de impacto ambiental destas possíveis ações.

1.7 Referências

BOAVENTURA E. M. **Metodologia de Pesquisa**. São Paulo: Editora Atlas, 2004.

CAMANHO, M. T.; MORAES, A. E.; MORANO, S. R. Simulação de portfólios de projetos: uma aplicação de programação por metas para empresas de distribuição de energia. In: ENCONTRO DA ANPAD, 38., 2013, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: EnANPAD, 2013.

COSSI, A. M.; DA SILVA, L. G. W.; LAZARO, R. A. R.; MANTOVANI, J. R. S. Primary power distribution systems planning taking account reliability operation and expansion costs. **IET Generation, Transmission & Distribution**, New York, v. 6, p. 274-284, Jan 2012.

FERRET, R. **Hierarquização de alimentadores para fins de manutenção utilizando análise multicriterial**. 2012. 164p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Editora Atlas, 1991.

GOMES, L.; GOMES, C.; ALMEIDA, A. **Tomada de Decisão Gerencial: enfoque multicritério**. São Paulo: Atlas, 2002.

LUCINI, F. R. **Método de identificação de quedas de consumo atípicas em unidades consumidoras de energia elétrica**. 2010. 133p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

LUSVARGHI, S. A. S. **Impactos econômicos da descontinuidade do serviço elétrico utilizando um modelo de mercado**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, Itajubá, 2010.

KNAK, N. **Sistema multivariável para avaliação de desempenho e estabelecimento de limites de continuidade de fornecimento de energia utilizando a lógica fuzzy**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2012.

PINTO, C. L. D. S. **Otimização em dois níveis aplicada a priorização de obras do sistema de distribuição, voltada ao cumprimento dos índices de continuidade**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

SONCINI, P. **Modelagem multicriterial para análise de projetos de investimento – o caso de uma distribuidora de energia elétrica**. 2008. 152p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

2 PRIMEIRO ARTIGO: TOMADA DE DECISÃO DE INVESTIMENTO ATRAVÉS DE MÉTODO MULTICRITÉRIO PARA FINS DE PLANEJAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO: ANÁLISE DE ESTUDOS EMPÍRICOS

Resumo

O presente trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre o estudo do processo decisório através de métodos multicritérios de apoio à decisão para utilização em priorização de investimentos em energia elétrica. Para o desenvolvimento desta revisão foram utilizados 52 artigos provenientes de periódicos, congressos e livros, os quais foram estratificados, baseados na similaridade de seus temas, em dois temas: (i) o processo decisório na tomada de decisões em investimento, e (ii) principais métodos de decisão multicritério utilizados em estudos de casos com aplicação de técnicas e metodologias para priorização de investimentos em energia elétrica. Verificou-se que as pesquisas sobre priorização multicriterial estão em nível de maturidade alta; porém, ao direcionar a pesquisa para áreas específicas de priorização de investimento em energia elétrica, a maturidade e aplicabilidade das ideias propostas são menores. O referencial bibliográfico aborda os aspectos principais de três métodos: AHP, MAUT e ELECTRE. Por fim, apresentam-se os aspectos principais de cada método, aplicações realizadas no setor de energia e quadro comparativo dos métodos.

Palavras-chave: processo decisório, priorização multicriterial de investimentos, métodos multicritério de apoio à decisão, energia.

2.1 Introdução

O sistema elétrico de potência necessita de investimentos constantes para atender a demanda dos consumidores e os critérios estabelecidos pela agência reguladora (ANEEL). Os investimentos devem levar em consideração o crescimento da carga e a necessidade de incrementar qualidade e confiabilidade no fornecimento de energia elétrica da empresa distribuidora para os seus clientes (SONCINI, 2008).

Atualmente, é necessário ser cada vez mais eficiente na tomada de decisão de alocação do recurso financeiro para resolução dos potenciais riscos técnicos apresentados pelo sistema. Portanto, as decisões têm relação direta com a priorização de gargalos, visando evitar o esgotamento da capacidade de atendimento dos atuais e futuros clientes sem comprometer economicamente a região atendida, bem como a manutenção de um atendimento confiável e de qualidade (SONCINI, 2008).

A tomada de decisão pode ser definida como o processo que leva, direta ou indiretamente, à escolha de ao menos uma dentre várias alternativas, todas candidatas a resolver determinado problema (GOMES; GOMES; ALMEIDA, 2002). Ela faz parte do cotidiano de uma empresa de energia elétrica, sendo uma atividade complexa e muitas vezes controversa (SOARES, 2015). O objetivo é escolher entre possíveis alternativas de ação, mas também entre pontos de vista e diretrizes de avaliar estas ações. A tomada de decisão multicritério, na maioria das situações, auxilia o ato de decidir em diferentes ambientes, com vários objetos envolvidos e geralmente conflitantes entre si. Tal conflito, como por exemplo, pode se manifestar em aumento no nível de desempenho, que vem acompanhado em aumento no custo operacional, estabelecendo-se um *trade-off* (GOMES; GOMES; ALMEIDA, 2002).

O processo que envolve a tomada de decisão em ambientes corporativos está cada vez mais complexo devido à influência de diversos fatores, recursos e variáveis no processo decisório e à velocidade com que estes interagem entre si, alternando-se mútua e continuamente em cenários de risco e incerteza. Portanto, devido às incertezas nas organizações a tomada de decisões estratégicas exige dos decisores melhores julgamentos, que possam tornar clara a escolha das alternativas (WRIGHT; KROLL; PARNELL, 2000).

Neste contexto, Fensterseifer, Galesn e Ziegelmann (1987) destacam que as decisões que envolvem particularmente investimentos de capital (ou *capex*), por geralmente imobilizarem grandes volumes de recursos em longos períodos de tempo, constituem um desafio de vital importância para o futuro de uma empresa. Este é o caso de empresas do setor elétrico, já que são decisões nesse âmbito que asseguram sua sobrevivência e crescimento.

Jansen, Shimizu e Jansen (2004) afirmam que tradicionalmente as empresas elaboram estudos de viabilidade econômica para avaliarem suas alternativas de investimento. Mesmo conhecendo a relevância de variáveis qualitativas, devido à dificuldade em quantificá-las, é comum que decisões estejam focadas em aspectos eminentemente quantitativos.

No cenário particular de cada empresa existem variáveis qualitativas que são mais ou menos importantes em um processo de decisão de investimento. Conforme Soncini (2008), nenhuma metodologia substitui a capacidade de julgamento e decisão dos envolvidos no processo. Os modelos matemáticos contribuem ao auxiliar os decisores no ato de escolher com melhor embasamento e em um menor período de tempo; ou seja, melhoram a eficácia do processo decisório.

A proposta geral deste artigo é identificar nas decisões de investimento o processo decisório que ocorre na tomada de decisão de priorização de investimentos em energia elétrica

através de métodos multicritérios de apoio à decisão. O objetivo é a identificação das pesquisas realizadas sobre o tema, através de uma revisão bibliográfica sobre o assunto. Com esse estudo, pretende-se identificar os seguintes caracterizadores da literatura: (i) contextualização do processo decisório na tomada de decisão em investimento (ii) principais métodos de priorização multicriterial utilizados; (iii) aplicações realizadas no setor de energia elétrica; (iv) principais periódicos onde pesquisas sobre o assunto são veiculadas; e (v) oportunidades de pesquisas.

Este artigo está organizado em quatro seções. Após esta introdução, a seção 2 apresenta o método de pesquisa para obtenção dos artigos e trabalhos acadêmicos relacionados a processo decisório e priorização multicriterial. A seção 3 apresenta o referencial teórico abordando a contextualização do processo decisório na tomada de decisão em investimentos, principais métodos multicritérios de apoio à decisão e aplicações realizadas. Por fim, a seção 4 apresenta as conclusões do estudo, destacando-se que os métodos multicritérios para apoio à tomada de decisão agregam um valor substancial ao processo decisório e a sugestão de trabalho futuro.

2.2 Metodologia

Para se obter os artigos e trabalhos acadêmicos relacionados ao processo decisório utilizando priorização multicriterial de investimentos em energia elétrica, foram realizadas pesquisas por palavras e expressões em bases de referências. As etapas que compõem o método de obtenção das referências utilizadas por essa revisão, as quais ocorreram de forma sequencial, foram: (i) definição das palavras a serem pesquisadas, (ii) escolha das bases de referências a serem utilizadas, (iii) busca das referências nas bases, (iv) exclusão e inclusão das referências baseadas no título, (v) no resumo e, por fim, (vi) em análise completa dos estudos. Logo após a aplicação dessas etapas, alguns artigos e/ou trabalhos acadêmicos que eram relevantes para os objetivos dessa pesquisa e estavam sendo referenciados pelos estudos resultantes da aplicação do método de busca foram adicionados.

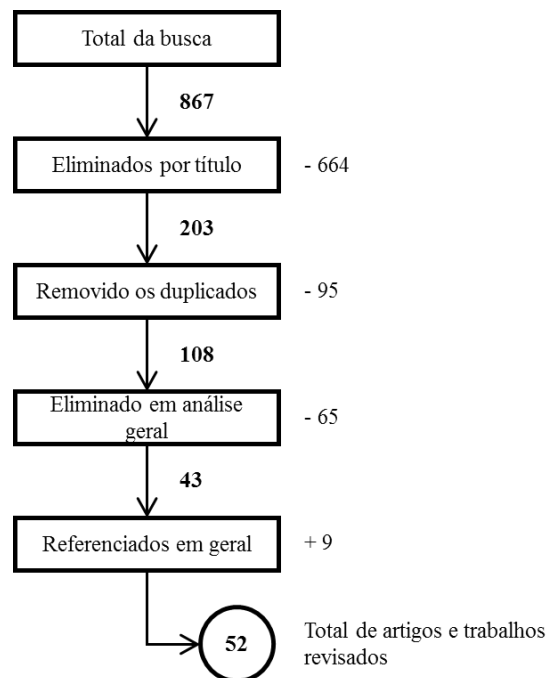
Para realizar a definição das palavras a serem pesquisadas nas bases de referências foram analisados, de forma preliminar, alguns artigos sobre a área de priorização de investimentos em energia e identificadas quais eram as palavras e expressões mais recorrentes.

As bases de referências a serem pesquisadas foram definidas de forma a abranger trabalhos e artigos que apresentassem temas afins entre as áreas de energia e gestão da produção. As seguintes bases foram selecionadas: dissertações e teses da base

LUME/UFRGS, artigos em periódicos nas bases SCIELO, Scholar Google, ELSEVIER e IEEE Xplore.

Após a definição das palavras (processo decisório, priorização multicriterial de investimentos em energia, métodos multicritério de apoio à decisão) e bases de referências a serem utilizadas, iniciou-se a busca efetiva de trabalhos nas bases, sempre com objetivo de identificar referências relacionadas com a área de energia, mais precisamente no segmento de energia elétrica. Após a primeira análise pelo título, selecionaram-se 203 artigos. Após a eliminação de 95 trabalhos duplicados, chegou-se a 108 resultados únicos. Realizou-se então a análise dos resumos, selecionando 58 artigos para serem integralmente analisados. Após a leitura integral dos documentos, chegou-se a 43 artigos, aos quais foram adicionados 9 considerados relevantes e referenciados pelos resultados da busca, chegando-se a um total de 52 trabalhos para serem utilizados no desenvolvimento deste trabalho.

Figura 1: Resultados da seleção dos artigos e trabalhos para a revisão bibliográfica



Fonte: Elaborada pelo autor (2017)

Dos 52 trabalhos definidos para essa pesquisa, verificou-se que 24 (46%) eram provenientes de periódicos científicos, 12 (23%) eram livros, 11 (21%) eram trabalhos acadêmicos e 5 (10%) eram artigos de congressos. Os periódicos com maior incidência de artigos foram os internacionais (63%), abrangendo os periódicos *European Journal of Operational Research*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, *International Journal of Production Research*, *Journal of Risk Research* e

International Journal of Services Sciences. Os periódicos nacionais (37%) selecionados são a Revista de Administração de Empresas, Revistas Brasileira de Pesquisa Operacional, Revista Gestão da Produção e Revista Contabilidade e Finanças.

Os artigos foram divididos em 2 grupos, os quais foram vinculados a linhas de pesquisa. Os agrupamentos foram assim nomeados: (i) processo decisório na tomada de decisões em investimento, e (ii) principais métodos de apoio à decisão multicritério com aplicação de técnicas e metodologias para priorização de investimentos em energia elétrica.

Os artigos do grupo (i) trazem discussões conceituais do processo decisório nas decisões relacionadas a investimento e a tomada de decisão considerando valores tangíveis e intangíveis. Os artigos do grupo (ii) dizem respeito à abordagem de métodos de decisão multicritério, estratégias de aplicação destes métodos de apoio à decisão e alguns exemplos de aplicações em priorização de investimentos em energia elétrica.

2.3 Processo Decisório Através de Métodos Multicritério de Apoio à Decisão

Segundo Gomes, Gomes e Almeida (2002), o processo decisório consiste na análise de um conjunto de alternativas geralmente associadas a um conjunto de recursos, que concorrem para solução de problemas previamente identificados. Seu objetivo é atender simultaneamente aos requisitos do mercado, aos requisitos internos da empresa e aos interesses dos acionistas e demais partes interessadas, levando em consideração variáveis quantitativas e qualitativas que permeiam o processo.

O processo de tomada de decisão de elevada complexidade está cada vez mais presente no ambiente empresarial competitivo, sendo fundamental tomar decisões mais rápidas, corretas e abrangentes (GOMES; GOMES; ALMEIDA, 2002). Na área de energia, o processo está constantemente mais complexo, sendo imprescindível além de dados financeiros, acrescentar elementos quantitativos e qualitativos, portanto, aumentando o grau de dificuldade das decisões e abrindo espaço para muitos estudos a respeito do assunto (SOARES, 2015).

Neste contexto, a tarefa mais desafiadora, e talvez uma das mais complexas na atualidade das organizações, recai sobre a necessidade de tomar decisões que atendam a múltiplos objetivos, critérios e restrições, inseridas num cenário de incertezas e *trade-offs*. Portanto, reforça-se a necessidade de habilidade gerencial e da importância da utilização de ferramentas de auxílio no processo decisório (PERDIGÃO, 2012).

Robbins (2010) destaca que o estado de competição em que nossa sociedade está submetida exige a utilização de ferramentas cada vez mais eficientes, eficazes e flexíveis para

a tomada de decisão. Estas ferramentas devem ser capazes de tratar problemas complexos em uma linguagem de simples entendimento, e considerar os elementos principais do processo decisório, dentre os quais destacam-se os seguintes (CHIAVENATO, 2003):

- **Decisor:** é o indivíduo ou grupo de indivíduos que faz uma escolha dentre vários cursos de ação disponíveis;
- **Objetivos:** são os objetivos que o decisor pretende alcançar com as suas ações;
- **Crítérios:** critérios que o decisor utiliza para determinar suas preferências;
- **Estratégia:** curso de ação que o decisor escolhe no sentido de atingir os objetivos da melhor forma, sendo esta dependente dos recursos disponíveis;
- **Estado da natureza:** condições de incerteza, risco, ou certeza que existem no processo decisório, fora do controle do decisor e que o decisor deve enfrentar;
- **Resultado:** é a consequência de uma estratégia.

Porto e Bandeira (2006) ressaltam que o estado da natureza, os objetivos e a situação irão determinar as alternativas possíveis para a escolha da estratégia que melhor definirá a tomada de decisão. Por fim, os resultados serão consequências da estratégia estabelecida para alcançá-los.

É importante, no início de um processo decisório, definir e identificar os atores e decisores que estarão envolvidos na tomada de decisão e na construção do modelo. Além disso, é necessário identificar o tipo de ação ou alternativa que será avaliada pelo modelo multicriterial. Ao final, deve-se definir qual o tipo de avaliação que será realizada pelo modelo, ou seja, escolher a problemática de referência (ENSSLIN; MONTIBELLER; NORONHA, 2001). Conforme Gomes, Gomes e Almeida (2002), com as definições iniciais concluídas, o processo decisório deve seguir os seguintes passos principais:

a) **Análise e identificação da situação e do problema:** a situação e o ambiente onde o problema está inserido devem ser claramente identificados.

b) **Desenvolvimento de alternativas:** as pessoas encarregadas das decisões devem compartilhar da sua experiência na identificação de possíveis alternativas para a resolução do problema proposto.

c) **Comparação entre alternativas:** devem-se relacionar vantagens e desvantagens de cada alternativa bem como os custos envolvidos.

d) **Classificação dos riscos de cada alternativa:** deve-se mensurar o grau de incerteza, imprecisão e ambiguidade de cada alternativa. Normalmente, é apresentada como complexidade mais frequente a presença de um grande número de alternativas, bem como

identificação de critérios envolvidos no processo de decisão e o estabelecimento da importância relativa entre esses critérios.

e) **Escolha da melhor alternativa:** uma vez identificadas as vantagens, desvantagens e os riscos, os decisores devem ser capazes de identificar as alternativas que melhor “solucionem” os problemas.

f) **Execução e avaliação:** os resultados da implementação do processo decisório devem ser analisados e comparados, objetivando validar ou não o processo utilizado. Assim, erros detectados não serão repetidos em decisões futuras.

Segundo Von Winterfeldt e Fasolo (2009), deve-se representar o problema de forma clara e transparente, para então, seguir os passos principais do processo decisório, a partir das visões dos decisores sobre seus objetivos, restrições, receios e incertezas. Como resultado desse processo, em um problema com múltiplos critérios, procura-se obter a hierarquia dos objetivos ou critérios e definir ou identificar um conjunto de opções, para melhor tomada de decisão (MONTIBELLER *et al.*, 2009).

Conforme Freitas e Moscarola (2002), informação é essencial à tomada de decisão e os decisores não devem basear-se em dados puramente quantitativos, dado que o processo de avaliação de alternativas envolve elementos de preferências, julgamentos pessoais e opiniões. Moraes (2000) afirma que deve-se utilizar métodos qualitativos e quantitativos para auxiliar no processo decisório, pois os métodos qualitativos permitem ao decisor estudar questões de modo profundo e detalhado, o que aumenta o entendimento de situações estudadas, apesar de reduzir a possibilidade de generalização.

Métodos quantitativos e qualitativos não são mutuamente excludentes, ou seja, é possível utilizar-se de um método de avaliação misto, observando os parâmetros e o que deve ser medido. Portanto, segundo Eid Junior (1996), a abordagem multicritério no processo de avaliação de alternativas de investimento proporciona expandir os limites de escopo nos quais as decisões são tomadas, buscando complementar a subjetividade e as preferências dos decisores no conjunto dos critérios quantitativos que irão colaborar para definição de rumo de ação a ser adotado.

A literatura referente à área de apoio à decisão estabelece uma divisão fundamentada em dois paradigmas principais: o paradigma racionalista, normalmente utilizado pela pesquisa operacional tradicional e o paradigma construtivista, usualmente utilizado pelos métodos multicritério de apoio à decisão. Na Tabela 1, Ensslin, Montibeller e Noronha (2001) apresentam as características dos paradigmas racionalista e construtivista.

Tabela 1: Características dos paradigmas racionalista e construtivista

Características	Paradigma Racionalista	Paradigma Construtivista
Tomada de Decisão	Momento em que ocorre a escolha da solução ótima	Processo ao longo do tempo envolvendo interação entre os atores
Decisor	Totalmente racional	Dotado de sistema de valores próprio
Problema a ser resolvido	Problema real	Problema construído
Modelos	Representam a realidade objetiva	Ferramentas aceitas pelos decisores como úteis no Apoio à Decisão
Resultados dos Modelos	Soluções ótimas	Recomendações que visam atender aos valores dos decisores
Objetivo da Modelagem	Encontrar a solução ótima	Gerar conhecimento aos decisores sobre seu problema
Validade do Modelo	Modelo é válido quando representa a realidade objetivamente	Modelo é válido quando serve como ferramenta de Apoio à Decisão
Preferência dos Decisores	São extraídas pelo analista	São construídas com o facilitador
Forma de Atuação	Tomada de Decisão	Apoio à Decisão

Fonte: Ensslin, Montibeller e Noronha (2001).

Ensslin, Montibeller e Noronha (2001) salientam que o paradigma construtivista é mais adequado quando se deseja apoiar decisões, sendo constantemente utilizado pelos métodos multicritério. Os métodos multicritério de apoio à decisão (MMAD) são aplicados em diversas áreas com o objetivo de selecionar, ordenar, classificar ou descrever alternativas presentes em um processo decisório na presença de múltiplos critérios (SHIMIZU, 2006).

Shimizu (2006) relata que os métodos de otimização matemática utilizados até a década de 1960 eram inadequados para tratar os problemas com múltiplos critérios e variáveis qualitativas, em função da necessidade de haver equações matemáticas bem definidas para representar objetivos múltiplos e condições de restrição, e por não incorporarem variáveis ou restrições qualitativas.

Schmidt (1995) destaca que as abordagens multicritério baseiam-se no princípio de que a experiência e o conhecimento das pessoas são tão valiosos quanto os dados considerados na análise de uma alternativa. Os métodos permitem avaliar critérios que não podem ser transformados em valores financeiros, sendo possível incluir no processo diferenças e conflito de opiniões. Kimura e Suen (2003) afirmam que a adoção de metodologias de apoio à decisão multicritério são particularmente muito interessantes em problemas de investimento, em que existam diversos tipos de decisores, nos casos que envolvem características quantitativas e qualitativas de difícil mensuração ou que representem pontos de vista conflitantes.

Segundo Wang *et al.* (2009), há diferentes métodos que podem ser empregados em problemas com múltiplos critérios; eles podem ser agrupados em três categorias: (i)

elementares, (ii) com critério único de síntese, e (iii) de sobreclassificação. Os elementares são métodos que utilizam a abordagem de tentativas e erros, e estruturas de programação matemática multiobjetivo, tendo como exemplo a ordenação por dominância, Maximin, Maximax, o método Lexicográfico e a soma ponderada. Os métodos multicritério com critério único de síntese são o SMARTS, MAUT, MAVT e AHP, que tem como característica permitir a definição de uma função que busca agregar valores de cada alternativa sujeita a cada critério. Já os métodos de sobreclassificação buscam construir relações de sobreclassificação, as quais representam as preferências estabelecidas pelo decisor, e posteriormente explorá-las de tal forma que auxilie o decisor na solução do problema, destacam-se os métodos da família ELECTRE e PROMETHEE.

Todas as categorias acima listadas podem ser utilizadas no apoio à decisão. Vale destacar que a maioria dos pesquisadores de métodos multicritério de língua inglesa adota o paradigma racionalista, utilizando majoritariamente as abordagens de critério único de síntese e de julgamento local interativo. Os pesquisadores voltados às metodologias multicritério em apoio à decisão são em sua maioria de língua francesa, utilizam geralmente a abordagem de sobreclassificação. Contudo, nada impede que se adote o paradigma construtivista utilizando-se, no entanto, uma abordagem de critério único de síntese, através da escolha de métodos como o MAUT ou o AHP (ENSSLIN; MONTIBELLER; NORONHA, 2001). Hokkanen *et al.* (1998) destacam ser uma prática comum a combinação de um ou mais métodos para a resolução de problemas complexos, como na área de energia.

Wang *et al.* (2009), no âmbito de energia sustentável, disponibilizam um amplo levantamento dos principais métodos utilizados para seleção de critérios, determinação de pesos, análise multicritério e agregação (no caso onde se tem mais de um decisor). Pohekar e Ramachandran (2004) abordam os métodos AHP, MAUT e ELECTRE como principais na aplicação de tomada de decisão no planejamento energético sustentável.

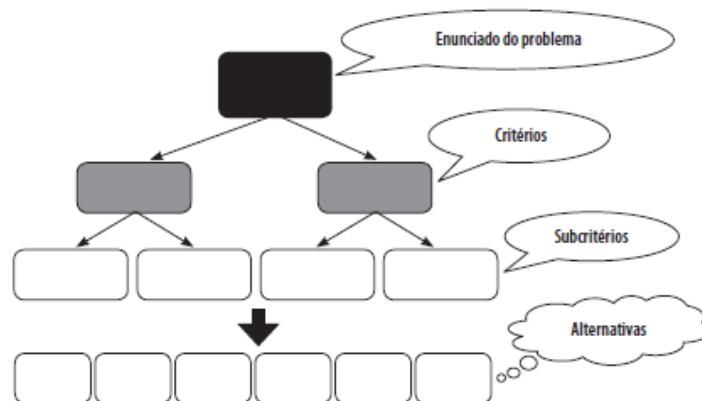
Antunes e Gomes (2009) analisaram artigos com aplicações de métodos e combinações nos setores de petróleo, gás e energia, focados na tomada de decisão e destacaram que as mudanças em curso na organização do setor de energia, especificamente no setor elétrico, tais como a dissociação de atividades anteriormente verticalmente integradas, a tendência para liberação dos mercados da energia e as preocupações sócio econômicas no âmbito do desenvolvimento sustentável, trazem novos desafios na gestão eficiente dos recursos e, com isso, novas oportunidades para os métodos multicritério de apoio à tomada de decisão.

2.3.1 Analytic Hierarchy Process – AHP

O AHP (*Analytic Hierarchy Process* ou Processo Analítico Hierárquico) é um método de apoio à análise de problemas de decisão multicritério complexos, podendo envolver critérios qualitativos e quantitativos (NILIAHMADABADI; NAJAFI; GHOLAMI, 2013). O método foi desenvolvido nos anos 1970 por Thomas Saaty, tendo sido criado para refletir o modo como as pessoas pensam. Ishizaka e Nemery (2013) indicam que o AHP é ainda um dos métodos mais usados, sendo aplicado para tomada de decisão em vários contextos complexos, nos quais as pessoas trabalham para tomar decisões considerando as percepções humanas, julgamentos e consequências, considerando uma visão de longo prazo.

Guglielmetti, Marins e Salomon (2003) ressaltam que este método trabalha a partir de comparações pareadas, as quais são feitas utilizando uma escala de decisões absoluta, que representa quanto mais um elemento domina o outro no que diz respeito a um determinado atributo. Para isso, é necessária a estruturação do problema proposto em níveis hierárquicos. No topo da hierarquia está o problema abordado e no nível mais baixo as alternativas, dentre as quais se deseja escolher a melhor. Nos níveis intermediários têm-se os critérios e subcritérios de avaliação, conforme Figura 2 (Martins e Coelho, 2012).

Figura 2: Representação da estrutura hierárquica



Fonte: Martins e Coelho (2012)

Segundo Bornia e Wernke (2001), a estrutura hierárquica possibilita ao decisor uma visualização global do problema como um todo e de seus elementos, bem como interações destes elementos e os impactos que os mesmos exercem sobre o sistema. Saaty (2008) afirma que não existe uma técnica específica para definição desta hierarquia; a forma de fazê-la baseia-se em sessão livre de *brainstorming*.

O próximo passo é realizar a avaliação de preferência com relação a cada elemento de decisão em um dado nível de hierarquia. Esta etapa tem o objetivo de determinar o peso com

o qual os elementos num nível influenciam os elementos do nível mais alto seguinte, de forma que se possam apurar os pesos relativos dos impactos dos elementos sobre o nível mais baixo e sobre os objetivos gerais (SAATY, 1991).

A importância relativa dos critérios/alternativas surge por comparações pareadas, com resultados escritos em matrizes de preferências. As preferências quantificadas através de comparações pareadas são representadas por uma matriz ($n \times n$), conforme Figura 3 (Saaty, 1991). Os elementos a_{ij} pertencentes a esta matriz são definidos por um processo de comparação pareada englobando os julgamentos dos especialistas envolvidos no processo de ponderação (SCHIMIDT, 1995).

Figura 3: Matriz de Comparações Pareadas

$$\begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1/a_{n1} & 1/a_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Fonte: Saaty (1991)

As comparações pareadas, expressas em termos verbais, são convertidas em valores numéricos usando a Escala Fundamental de Saaty para julgamentos comparativos, apresentada na Tabela 2. (Saaty, 1991). O preenchimento segue a seguinte lógica: se $a_{ij} = \alpha$, logo $a_{ji} = 1/\alpha$, pois relaciona o fato de que se a_i é, em algum grau, mais importante que a_j , então a_j é, no mesmo grau, menos importante que a_i .

Tabela 2: Escala Fundamental de Saaty

Julgamento de prioridades: a_i em relação a_j	Peso
Absolutamente dominante	9
Extremamente dominante	7
Muito mais importante	5
Mais importante	3
Igual	1
Menos importante	1/3
Muito menos importante	1/5
Extremamente menos dominante	1/7
Absolutamente menos dominante	1/9

Fonte: Saaty (1991)

Segundo Saaty (1991), após o preenchimento da matriz é necessário extrair seu par de autovetor e autovalor principais. O autovetor fornece os pesos de importância ou preferência dos elementos comparados na matriz. A consistência da solução obtida, entretanto, deve ser

testada através do cálculo do autovalor, utilizado no cálculo do índice de consistência (IC) e, este, no cálculo da razão de consistência (RC). Para valores de RC maiores que 0,10 sugere-se uma revisão das informações prestadas pelos decisores sobre as comparações organizadas na matriz. Para maiores detalhes, ver Abreu *et al.* (2000).

Ao final, para determinação do nível de preferência das alternativas, realiza-se comparações pareadas das mesmas relativamente a cada um dos critérios, de modo análogo ao descrito para a obtenção da importância relativa dos critérios. Com estas importâncias relativas e os pesos de preferência das alternativas, efetua-se, em seguida, a valoração global de cada uma das alternativas, utilizando-se o método da soma ponderada, expresso pela equação (1), retirada de Saaty (1991). A partir da execução dos procedimentos descritos, obtêm-se subsídios consistentes para a tomada de decisão da escolha da alternativa mais satisfatória (CASAROTTO FILHO, 2002).

$$V(a) = \sum_{j=1}^n p_j v_j(a) \quad (1)$$

Onde:

- $V(a)$ - é o valor global da alternativa analisada;
- p_j - importância relativa do critério j ;
- v_j - nível de preferência da alternativa analisada no critério j .

De acordo com Guglielmetti, Marins e Salomon (2003) e Shimizu (2006), entende-se que o método AHP é um dos métodos mais utilizados no apoio à decisão e na resolução de conflitos. Destaca-se com uma das grandes vantagens a maneira como os decisores expressam suas preferências. A expressão na forma qualitativa proporciona uma interação mais natural e também mais fácil com os atores que estão envolvidos no processo, sendo importante quando lidamos com várias pessoas, de interesses e níveis de conhecimento diferentes. Segundo Vaidya e Kumar (2006), outro destaque é a capacidade de medir o grau de consistência presente nos julgamentos e, desse modo, assegurar que somente elementos justificáveis sejam usados como base para avaliações.

Conforme Gomes (2007), uma das principais críticas ao método refere-se ao número elevado de comparações, quando o modelo estruturado é composto por um grande número de critérios e alternativas. Entretanto, segundo Salomon (2010), quando comparado a outras metodologias (e.g. o método MACBETH), o AHP demanda um menor número de comparações.

O AHP tem sido aplicado recorrentemente na comparação de alternativas e critérios de priorização utilizados por distribuidoras de energia elétrica. Fernandes (2014) utilizou o método para determinação dos ativos prioritários no sistema de distribuição para realização de atividades de manutenção, utilizando-se de critérios focados em reduzir compensações financeiras realizadas pela distribuidora em virtude de transgressões dos indicadores de qualidade. Daza (2010) utilizou o AHP com o objetivo de determinar a melhor alocação de dispositivos de proteção telecomandados em redes de distribuição de energia elétrica, visando aumentar a confiabilidade do sistema. Para isso, consultaram-se os especialistas da distribuidora de energia para identificação dos critérios e suas importâncias para priorizar os locais para instalação dos equipamentos em função dos benefícios que representam.

Ferret (2012) utilizou o AHP para hierarquizar alimentadores com a finalidade de receber atividades de manutenção preventiva, através da definição de critérios de confiabilidade, critérios técnicos e dados históricos da rede. As alternativas são os alimentadores que serão priorizados de acordo com o julgamento de especialistas da distribuidora estudada. Soares (2015) apresentou uma comparação entre as metodologias AHP e PROMETHEE para a priorização de investimentos na rede primária de distribuição de energia elétrica, buscando associar aspectos práticos, como a otimização da capacidade de execução das empresas.

2.3.2 Teoria da Utilidade Multiatributo – MAUT

A Teoria da Utilidade Multiatributo, referida frequentemente por MAUT (*Multi-Attribute Utility Theory*), derivou da Teoria da Utilidade, um modelo matemático utilizado para representar a preferência do decisor pelas alternativas candidatas à resolução de um problema decisório. Este método permite que o decisor estruture um problema complexo em forma de uma simples hierarquia e avalie subjetivamente um grande número de critérios, tanto qualitativos como quantitativos, podendo inclusive envolver a análise de risco e incerteza (MIN, 1994).

O MAUT é empregado para determinar a importância atribuída a um critério em relação a outro e priorizar alternativas a partir da construção de uma equação matemática (ALMEIDA, 2005). Superadas as etapas iniciais de definição, é necessário quantificar o desempenho de cada alternativa em relação a cada critério utilizando escala de 0 a 100; os valores devem ser normalizados para que fiquem no intervalo entre zero e um.

Prosseguindo, é necessário que os critérios escolhidos sejam avaliados e que sejam atribuídos pesos a eles. Uma das técnicas utilizada com frequência no MAUT para estabelecer

tais pesos é o *Swing Weight* (FRENCH; BEDFORD; ATHERTON, 2005), que estabelece uma referência (*benchmark*), definida pela pior situação possível. Em seguida, o decisor deve dar notas aos critérios, começando pelo mais importante. O passo seguinte é identificar o segundo critério mais importante e atribuir uma nota menor a que foi atribuída ao critério já escolhido e assim, sucessivamente, até que todos os critérios tenham recebido uma nota. A última etapa consiste em calcular o peso de cada critério, dividindo a nota do critério pela soma das notas de todos critérios. Esta é uma das principais etapas que diferem o MAUT do método AHP, que utiliza uma escala sugerida por Saaty (1991) para avaliar as preferências do decisor. Com essas informações disponíveis, a equação da função de utilidade pode ser aplicada (ALMEIDA, 2013).

Gomes, Gomes e Almeida (2002) destacam que essa equação é conhecida como função de utilidade multiatributo; a maioria das aplicações do método envolve o uso de uma função utilidade aditiva, permitindo que as contribuições individuais dos critérios possam ser somadas, conforme apresentado na equação (2).

$$U(a) = \sum_{i=1}^n k_i u_i(a) \quad (2)$$

Onde:

- $U(a)$ - é o valor ou pontuação global da alternativa a ;
- k_i - é o peso do critério i ;
- $u_i(a)$ - é o desempenho da alternativa a frente ao critério i .

Para que a estrutura de preferências do decisor possa ser representada por essa função, alguns pressupostos são assumidos. O mais importante é que não haja interação de preferências entre os critérios, isto é, que eles sejam independentes. Os critérios devem ser independentes para que o decisor possa também expressar preferências de forma independente (GOMES; GOMES; ALMEIDA, 2002).

Uma vez estabelecido que a função de utilidade aditiva será usada na análise MAUT, Gomes, Araya e Cirignano (2011) elencam as etapas que devem ser seguidas na aplicação do método:

- a) **Identificar os objetivos, as metas de decisão e o escopo do problema:** estas definições devem estar bem claras e devem ser realizadas pelo decisor;
- b) **Definir os critérios relevantes para o problema de decisão:** a definição dos critérios é um processo interativo. Pode se utilizar a técnica de *brainstorming* para

definição e, em casos mais complexos, sugere-se estruturar os critérios em uma hierarquia, semelhante ao abordado na explanação do método AHP na seção 2.3.1;

- c) **Definir as alternativas:** identificar quais alternativas serão avaliadas. Não existe um limite teórico para o número de alternativas;
- d) **Avaliar as alternativas em relação aos critérios:** nesta etapa, necessita-se quantificar o desempenho de cada alternativa que será avaliada em relação a cada critério, representada na equação (2) por $u_i(a)$;
- e) **Determinar a importância relativa dos critérios:** consiste em estabelecer pesos de importância aos critérios, representado por k_i na equação (2);
- f) **Determinar a pontuação global de cada alternativa:** usando a função de utilidade multiatributo na equação (2), determina-se o valor ou pontuação global de cada alternativa, que é obtida pelo somatório do produto do peso de cada critério pelo desempenho de cada alternativa. A melhor alternativa é aquela que apresentar o maior valor ou pontuação global;
- g) **Análise de sensibilidade:** na análise de sensibilidade, avalia-se a influência da alteração dos pesos relativos dos critérios sobre os valores globais obtidos para cada alternativa. A análise de sensibilidade pode restringir-se a um número reduzido de critérios, como, por exemplo, aqueles de maior peso para o decisor.

A vantagem do MAUT frente a outros métodos está no fato de que este proporciona uma avaliação mais abrangente, em que diversas alternativas podem ser comparadas; pode-se, por exemplo, avaliar mais de 500 alternativas, número muito superior ao que é considerado viável no método AHP (MIN, 1994). Além disso, o MAUT é considerado um método transparente, de fácil aplicação, pois o próprio decisor pode operar seu modelo, conferindo os pesos aos critérios atribuídos, e envolve operações matemáticas simples, fazendo dele um método multicritério de amplo entendimento (CASAROTTO FILHO, 2002). Entre suas desvantagens está a estratégia de avaliação das alternativas, que não inclui comparação direta entre alternativas, sendo diferente do método AHP (MIN, 1994).

Almeida (2005) escolheu o MAUT para apoiar os decisores na seleção de intervalos de manutenção preventiva utilizando uma função utilidade global, dada pela soma de duas funções parciais, a primeira para o critério custo utilizou-se uma função exponencial e para o critério confiabilidade uma função logística. Gabiatti (2004) utilizou comparações pareadas para definir a importância de cada critério, seguindo os preceitos do AHP, para então aplicar o MAUT na determinação da pontuação global de cada alternativa. O objetivo era priorizar as

melhores opções de investimento em programas de eficiência energética realizados por uma distribuidora de energia.

Løken, Botterud e Hollen (2009) concluíram que o MAUT é mais adequado do que o AHP para lidar na tomada de decisão em um problema de planejamento energético local. Para os autores, a utilização do MAUT com avaliações diretas, em escala de zero a um, lida melhor com as incertezas de mercado, se comparada à utilização da escala fundamental de Saaty e das comparações pareadas no AHP. Soncini (2008) utilizou o MAUT para auxiliar no processo de avaliação e seleção de alternativas de investimento em uma empresa de distribuição de energia elétrica através da modelagem de variáveis quantitativas, como índice de lucratividade, valor presente líquido e *payback* descontado, entre outras. Neste estudo, incluiu-se um número maior de alternativas e critérios mais complexos do que no trabalho do Gabiatti (2004), que utilizou basicamente critérios qualitativos na avaliação de alternativas de investimento, exclusivamente do segmento de eficiência energética, e não como Soncini (2008), que priorizou alternativas de investimento em bens de capital de uma distribuidora de energia.

2.3.3 *Elimination et Choix Traduisant la Réalité* – ELECTRE

Os métodos da família ELECTRE foram desenvolvidos na França na década de 1970. São classificados como métodos de sobreclassificação, logo, baseados na comparação pareada entre alternativas, porém sem estabelecer uma pontuação agregada para cada alternativa. Os métodos, assim, distinguem-se daqueles que utilizam a agregação através de critério único de síntese, como o MAUT e o AHP (ALMEIDA, 2013).

Uma característica importante do ELECTRE é que o método se baseia em avaliações não compensatórias, enquanto no MAUT e AHP as avaliações são compensatórias. Neste tipo de avaliação, a ideia principal é compensar o menor desempenho de uma alternativa relativamente a um dado critério através de um critério com melhor desempenho, ou seja, a avaliação de uma alternativa considera os *trade-offs* entre os critérios. Já no ELECTRE não acontece essa consideração, ou seja, o método não apresenta como característica a compensação entre critérios (SILVA *et al.*, 2014). Assim, a avaliação intercritério pode ser representada pelos pesos dos critérios, que assumem a noção de grau de importância (ALMEIDA, 2013).

Oliveira, Antunes e Gomes (2013) destacam que os métodos da família ELECTRE atuam a partir de um conjunto de alternativas e critérios, procurando através de um algoritmo reduzir o tamanho do conjunto de alternativas não dominadas pelas demais. Assume-se que o

decisor já definiu, previamente, os pesos dos diversos critérios considerados, refletindo a importância relativa dos mesmos. A ideia fundamental do método é eliminar alternativas que são dominadas pelas demais, dentro de certo limiar especificado. A família ELECTRE inclui várias versões do método, porém todas partem do mesmo princípio, diferenciando-se apenas nos procedimentos matemáticos finais, fazendo com que cada versão apresente um resultado específico (OLIVEIRA *et al.*, 2013). Na Tabela 3 apresentam-se as principais características dos métodos da família ELECTRE (MAYSTRE; PICTET; SIMOS, 1994).

Tabela 3: Características dos principais métodos da família ELECTRE

Método	Tipo de Problema	Tipo de Critério	Pesos
ELECTRE I	Seleção	Verdadeiro	Sim
ELECTRE IS	Seleção	Pseudo	Sim
ELECTRE TRI	Classificação	Pseudo	Sim
ELECTRE II	Ordenação	Verdadeiro	Sim
ELECTRE III	Ordenação	Pseudo	Sim
ELECTRE IV	Ordenação	Pseudo	Não

Fonte: Maystre, Pictet e Simos (1994)

As versões do método ELECTRE diferenciam-se operacionalmente e também com relação aos tipos de problemas em que podem ser usadas. O ELECTRE I e o IS procuram simplesmente reduzir o número de alternativas apresentadas ao decisor. Os métodos ELECTRE II, III e IV destinam-se à tarefa de construir uma ordenação das alternativas, da melhor à pior. O ELECTRE II é baseado em critérios verdadeiros e ordena as alternativas que não foram dominadas pelas demais; já o ELECTRE III aplica-se a casos onde uma família de pseudocritérios é considerada. Por pseudocritérios entendem-se aqueles que necessitam de dois limiares, um de indiferença e o outro de preferência, para que a escolha do decisor possa ser realizada. O ELECTRE IV também se baseia na consideração de uma família de pseudocritérios, mas ordena as alternativas sem introduzir nenhum peso para os critérios (GOVINDAN; JEPSEN, 2014).

Maystre, Pictet e Simos (1994) salientam que para a construção da relação de sobreclassificação são levados em conta os conceitos de concordância e discordância, e as seguintes definições se fazem necessárias:

- $g_i(a)$ = avaliação da alternativa a com relação ao critério g_i ;
- $g_i(b)$ = avaliação da alternativa b com relação ao critério g_i ;
- P_{g_i} = peso do critério g_i ;
- δ = avaliação maior – avaliação menor para o critério g_i ;

- $J^+(a, b) = g_i(a) > g_i(b)$: conjunto de critérios para os quais a alternativa a é preferida à alternativa b ;
- $J^=(a, b) = g_i(a) = g_i(b)$: conjunto de critérios para os quais a alternativa a é equivalente à alternativa b ;
- $J^-(a, b) = g_i(a) < g_i(b)$: conjunto de critérios para os quais a alternativa a é preferida à alternativa b ;
- $P^+(a, b) = \sum P_g$: soma dos pesos dos critérios pertencentes ao conjunto $J^+(a, b)$;
- $P^=(a, b) = \sum P_g$: soma dos pesos dos critérios pertencentes ao conjunto $J^=(a, b)$;
- $P^-(a, b) = \sum P_g$: soma dos pesos dos critérios pertencentes ao conjunto $J^-(a, b)$;
- $P = P^+(a, b) + P^=(a, b) + P^-(a, b)$: somatório dos pesos de todos os critérios.

Com os conceitos definidos, elenca-se as principais etapas para utilização do método ELECTRE (ENSSLIN *et al*, 2012):

- a) Identificar as alternativas a serem analisadas;
- b) Estabelecer os critérios a serem utilizados na avaliação;
- c) Atribuir peso a cada critério;
- d) Normalizar os valores dos pesos dos critérios;
- e) Estabelecer os índices de concordâncias e discordância para todos os pares de alternativas;
- f) Definir os limiares de concordância e discordância;
- g) Determinar o conjunto de dominância;
- h) Realizar análise de sensibilidade.

Para Almeida (2013), a aplicação do ELECTRE consiste em estabelecer os índices de concordância e discordância para todos os pares de alternativas. O índice de concordância de uma dada alternativa “a” em relação à outra alternativa “b” é definido como a proporção dos pesos para os quais “a” é preferível a “b”. Cada versão ou família dos métodos ELECTRE determina uma equação específica para o cálculo do índice de concordância. Por exemplo, no ELECTRE I tem-se que o índice de concordância entre as alternativas “a” e “b” é:

$$C(a, b) = \frac{\sum(P^+ + 0,5 \times P^=)}{\sum(P^+ + P^= + P^-)} \quad (3)$$

Já no ELECTRE II o índice é dado por:

$$C(a, b) = \frac{\sum(P^+ + P^=)}{\sum(P^+ + P^= + P^-)} \quad (4)$$

As equações acima estabelecem um valor que representa a concordância com a proposição “aSb” (a sobreclassifica b), o qual varia entre zero e um (MAYSTRE, PICTET, SIMOS, 1994).

Já ao estabelecer um índice de discordância determina-se uma medição da desvantagem relativa da alternativa “a” em relação “b”. Este índice é definido como a máxima diferença nos pesos dos critérios em que “b” é preferível a “a”, dividido pela máxima diferença entre os pesos dos critérios. Assim, tem-se que (ALMEIDA, 2013):

$$D(a, b) = 0 \text{ se } J^-(a, b) = \emptyset \quad (5)$$

$$D(a, b) = \max \left[\frac{g_i(b) - g_i(a)}{\delta} \right], g_i \text{ pertence } J^-(a, b) \quad (6)$$

O índice de discordância oferece a medida da oposição manifestada pelo(s) critério(s) discordante(s) à aceitação da hipótese “aSb” (a sobreclassifica b); ele varia também entre zero e um (GOMES; GOMES; ALMEIDA, 2002).

O próximo passo na aplicação é a determinação dos parâmetros requeridos para a definição dos limiares de concordância e de discordância. O decisor deve definir os parâmetros p e q a serem utilizados na identificação das relações de dominância. Os métodos na Tabela 3 diferenciam-se também na forma de determinação dessas relações. Por exemplo, no ELECTRE I tem-se que uma alternativa “a” domina uma alternativa “b” se e somente se (ALMEIDA, 2013):

$$\begin{cases} C(a, b) \geq p \\ D(a, b) \leq q \end{cases} \quad (7)$$

A partir da definição das relações de dominância, o próximo passo é a determinação do conjunto de dominância. Este conjunto, que consiste das alternativas que não são dominadas pelas demais relativamente aos critérios analisados, é apresentado ao decisor para que ele identifique ou selecione a melhor alternativa. Elementos presentes no conjunto de dominância não são dominados por nenhum outro elemento presente no conjunto; elementos que não estão no conjunto são dominados por pelo menos um elemento presente no conjunto de dominância. Observa-se que a definição dos pesos dos critérios e dos parâmetros p e q são fundamentais para a determinação dos índices de concordância e discordância e das relações de dominância, respectivamente. Assim, constituem uma etapa essencial para a utilização e validação dos métodos ELECTRE (GOMES; GOMES; ALMEIDA, 2002).

Finalmente, deverá ser feita uma análise de sensibilidade, variando-se os pesos atribuídos para cada critério e os limiares. A intenção de tal procedimento é analisar os efeitos dessas mudanças na obtenção do resultado, garantindo uma avaliação mais consistente do problema em questão (SIQUEIRA; ALMEIDA, 2011).

Guglielmetti, Marins e Salomon (2003) identificam como desvantagem do ELECTRE a necessidade de tratamento preliminar de dados, transformação da escala cardinal para a escala ordinal, dificuldade de implementação em alguns tipos de problemas devido à quantidade de informação necessária, acarretando também em problemas na definição dos limiares de concordância e de discordância, que podem ser atribuídos aleatoriamente comprometendo a modelagem do problema.

No âmbito de aplicação no setor de energia, Zelaya (2004) propôs uma metodologia para avaliar uma carteira de contratos de energia do ponto de vista econômico, aplicando o método ELECTRE III para classificar os contratos quanto ao risco. O diferencial do trabalho foi o autor utilizar complementarmente ao ELECTRE a lógica *fuzzy* na modelagem das variáveis de entrada do processo de comercialização de energia (preço *spot*, custos e energia), devido à dificuldade verificada na utilização do ELECTRE para este objetivo, pois existem imprecisões e indeterminações associadas tanto ao mercado de energia quanto às preferências do decisor.

Almeida e Mota (2007) desenvolveram uma nova proposta de método da família ELECTRE, o ELECTRE IV-H. A proposta é baseada no ELECTRE IV que, como apresentado anteriormente, foi desenvolvido para tratar casos em que não se pode definir os pesos dos critérios e nem mesmo considerar a ordenação deles. O ELECTRE IV-H traz uma estrutura diferente, pois não calcula índices de concordância e discordância e estabelece relações de sobreclassificação por referência direta às alternativas. No novo método os pesos dos critérios não são definidos diretamente; porém, relações intra-critérios são definidas por índices de concordância e de discordância parciais.

2.4 Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

O presente artigo apresentou uma revisão bibliográfica sobre o processo decisório na tomada de decisão sobre investimentos e os principais métodos de apoio à decisão utilizados na priorização multicriterial de investimentos em energia, visando apresentar estudos sobre o tema. Nesse trabalho, foi possível identificar com os autores e periódicos selecionados, a contextualização do processo decisório, os principais métodos que podem ser empregados em

problemas com múltiplos critérios e a importância, para as empresas, de adotar métodos formais para tomada de decisões, visando quantificar e avaliar fatores tangíveis e intangíveis. Os resultados da revisão foram divididos em três tópicos: processo decisório na tomada de decisão em investimentos, principais métodos multicritério que apoiam a tomada de decisão, e aplicações realizadas destes métodos em priorização de investimentos em energia elétrica.

Na Tabela 4, adaptada de Alves e Golhath (2007) e Shimizu (2006), apresenta-se o comparativo entre os três métodos de apoio à decisão abordados neste artigo.

Tabela 4: Comparativo entre os métodos de apoio à decisão

Características	MAUT	ELECTRE	AHP
Volume de informações de entrada	Pouco	Pouco	Médio
Compreensão conceitual	Médio	Complexo	Complexo
Tempo de aprendizado	Médio	Médio	Curto
Compreensão da forma de trabalho	Médio	Médio	Fácil
Trato de problemas complexo	Sim	Possível	Possível
Quantidade de aplicações práticas	Grande	Média	Grande
Volume de publicações científicas	Grande	Médio	Grande
Avaliação de novas alternativas (introdução de nova alternativa)	Analisada frente aos critérios, após comparada as demais	Todo processo reavaliado	Informação adicional de dominância possibilitando reversão
Forma de priorização	Utiliza escalar intervalar	Sem escala (superação)	Escala relacional (1 a 9)
Quanto à análise de sensibilidade	Passo fundamental	Não pressupõe como necessário	Não pressupõe como integrante

Fonte: Adaptado de Alves e Golhath (2007) e Shimizu (2006).

Dentre os três métodos analisados, destaca-se a aplicação na área de energia dos métodos AHP e MAUT. Braz (2011) ressalta que no método AHP a decomposição do problema facilita a estruturação, compreensão e avaliação, tendo como grande vantagem a maneira como os decisores expressam as suas preferências. No entanto, este método pode ser criticado devido à forma de determinação dos pesos dos critérios, e à possibilidade do processo se tornar muito cansativo caso envolva um grande número de critérios e alternativas, e, com isso, excessivas comparações.

O método MAUT tem como vantagens uma base teórica sólida, a possibilidade de fácil identificação de violações de coerência e de independência entre atributos e alternativas, além da aplicabilidade a diferentes tipos de problemas e em análises de decisão que envolvam resultados quantitativos e qualitativos. Contudo, é necessário um profundo conhecimento e detalhamento das variáveis e suas relações, além de habilidade por parte do decisor para definir as funções de utilidade (BRAZ, 2011).

Os métodos da família ELECTRE utilizam a modelagem de preferências baseada nas relações de sobreclassificação entre pares de ações. Uma das críticas a esta família de métodos está na arbitrariedade com que são estabelecidos os limites de preferência e indiferença necessários para avaliar os desempenhos das alternativas (ALMEIDA, 2013).

Ao final desta pesquisa, fica claro que os métodos multicritérios para apoio à tomada de decisão agregam um valor substancial à informação, pois não só permitem a abordagem de problemas considerados complexos, como é o caso da seleção de investimentos na área de energia elétrica, mas também dão ao processo de tomada de decisão clareza e transparência. Como trabalho futuro, propõe-se verificar e analisar aplicações de métodos multicritério de apoio à decisão com foco em gerenciamento de risco em ativos do setor elétrico.

2.5 Referências

ABREU, M. L.; GRANEMANN, S. R.; GARTNET, I.; BERNARDES, S. R. Escolha de um programa de controle de qualidade da água para consumo humano: aplicação do método AHP. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Paraíba, v. 4, n.2, p.257-262. 2000.

ALMEIDA, A. Modelagem multicritério para seleção de intervalos de manutenção preventiva baseada na teoria de utilidade multiatributo. **Revista Pesquisa Operacional**, São Paulo, v.25, n.1, p.69-81, jan./abr. 2005.

ALMEIDA, A. **Processo de Decisão nas Organizações**. São Paulo: Atlas, 2013.

ALMEIDA, A.; MOTA, C. Método multicritério Electre IV-H para priorização de atividades em projetos. **Revista Pesquisa Operacional**, São Paulo, v.27, n.2, p.247-269, mai./ago. 2007.

ALVES, L.; GOLHATH K. Comparação analítica entre métodos de apoio multicritério à decisão (AMD). In: ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E PÓS-GRADUAÇÃO DO ITA, 13., 2007, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos: ENCITA, v. 1, 2007.

ANTUNES, C. H.; GOMES, A. Operational research models and methods in the energy sector. **European Journal of Operational Research**, v. 187, n. 3, p. 1422-1428, June 2008.

BORNIA, C. A.; WERNKE, R. A. Contabilidade gerencial e os métodos multicriteriais. **Revista Contabilidade & Finanças**, São Paulo, v.14, n. 25, p. 60-71, jan./abr., 2001.

BRAZ, J. M. B. P. **O MacBeth com ferramenta MCDA para o benchmarking de aeroportos**. 2011. 73p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Aeronáutica) - Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, 2011.

CASAROTTO FILHO, N. **Projeto de Negócio: estratégias e estudos de viabilidade**. São Paulo: Atlas, 2002.

CHIAVENATO, I. **Introdução à Teoria Geral da Administração**. Rio de Janeiro: Campus, 2003.

DAZA, E. F. B. **Utilização da metodologia AHP para alocação de equipamentos telecomandados em sistemas de distribuição para melhoria da confiabilidade**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

EID JUNIOR, W. Custo e estrutura de capital: o comportamento das empresas brasileiras. **Revista de Administração de Empresas**, São Paulo, v.36, n.4, p.51-59, out./nov./dez. 1996.

ENSSLIN, L.; ANDREIS, M.; MEDAGLIA T. A.; DE CARLI H.; ENSSLIN, S. R. Modelo multicritério para avaliação e seleção de projetos de pesquisa e desenvolvimento em uma empresa distribuidora de energia. **Revista Gestão Industrial**, Paraná, v. 08, n.01, p.164-168. 2012.

ENSSLIN, L.; MONTIBELLER, G.; NORONHA, M. S. **Apoio à decisão – metodologias para estruturação de problemas complexos e avaliação de alternativas**. Florianópolis: Insular, 2001.

FENSTERSEIFER, J.; GASLENE, A.; ZIEGELMANN, J. A Utilização de técnicas analíticas nas decisões de investimentos de capital das grandes empresas brasileiras. **Revista de Administração de Empresas**, São Paulo, n.22, p.70-78, out./dez. 1987.

FERNANDES, L. **Ferramenta de apoio à decisão para priorização de obras de manutenção em redes de distribuição de energia elétrica.** 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

FERRET, R. **Hierarquização de alimentadores para fins de manutenção utilizando análise multicriterial.** 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

FREITAS, H.; MOSCAROLA, J. Da observação à decisão: métodos de pesquisa e análise quantitativa e qualitativa de dados. **Revista de Administração de Empresas.** São Paulo, v.1, n.1, p.2-30, jan./jun. 2002.

FRENCH, S.; BEDFORD, T.; ATHERTON, E. Supporting ALARP Decision Making by Cost Benefit Analysis and Multiattribute Utility Theory. **Journal of Risk Research,** v. 8(3), p. 207-223, 2005.

GABIATTI, A. **Desenvolvimento de um modelo de suporte multicriterial para gestão de programas de eficiência energética no segmento residencial das concessionárias de energia elétrica.** 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

GOMES, L. F. A. M. **Teoria da Decisão.** São Paulo: Thomson, 2007.

GOMES, L.; ARAYA, M.; CARIGNANO, C. **Tomada de Decisões em Cenários Complexos.** São Paulo: Cengage Learning, 2011.

GOMES, L.; GOMES, C.; ALMEIDA, A. **Tomada de Decisão Gerencial: enfoque multicritério.** São Paulo: Atlas, 2002.

GOVINDAN, K; JEPSEN, M. ELECTRE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. **European Journal of Operational Research,** v. 250, n. 1, p. 1-29, 2014.

GUGLIELMETTI, F. R.; MARINS, F. A.; SALOMON, V. Comparação teórica entre métodos de auxílio à tomada de decisão por múltiplos critérios. In: ENCONTRO

NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 23., 2003, Ouro Preto. **Anais...** Ouro Preto: ENEGEP, v. 23, 2003.

HOKKANEN, J.; LAHDELMA, R.; MIETTINEN, K.; SALMINEN, P. Determining the implementation order of a general plan using a multicriteria method. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**, n. 7, p. 273-284, 1998.

ISHIZAKA, A.; NEMERY, P. **Multi-Criteria Decision Analysis: Methods and Software**. 1^a. ed. Chichester: Wiley, 2013.

JANSEN, L.; SHIMIZU, T.; JANSEN, J. Uma análise de investimentos considerando fatores intangíveis. **Revista Produção Online**, v. 4, n. 4, 2004.

KIMURA, H.; SUEN, A. S. Ferramentas de análise gerencial baseadas em modelos de decisão multicriteriais. **Revista de Administração de Empresas**, São Paulo, v.2, n.1, p.1-18, jan./jun. 2003.

LØKEN, E.; BOTTERUD, A.; HOLLEN, A. T. Use of the equivalent attribute technique in multi-criteria planning of local energy systems. **European Journal of Operational Research**, v. 197, n. 3, p. 1075-1083, 2009.

MARTINS, F. G.; COELHO, L. Aplicação do método de análise hierárquica do processo para o planejamento de ordens de manutenção em dutovias. **Revista da Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, v. 7, n. 1, p. 65, 2012.

MAYSTRE, Y. L.; PICTET, J.; SIMOS, J. **Méthodes multicritères ELECTRE: description, conceils pratiques et cas d'application à la gestion environnementale** 1. ed. Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes, p. 323, 1994.

MIN, H. International Supplier Selection: A Multi-Attribute Utility Approach. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 24, n. 5, p. 24, 1994.

MONTIBELLER, G.; FRANCO, L. A.; LORD E.; IGLESIAS, A. Structuring resource allocation decisions: a framework for building multi-criteria portfolio models with area-grouped options. **European Journal of Operational Research**, v. 199, n. 3, p. 846-856, 2009.

MORAES, M. A. **Desenvolvimento de um método para avaliação qualitativa e quantitativa de fundos de investimento**. 2000. 154p. Dissertação (Mestrado em Administração) - Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

NILIAHMADABADI, M.; NAJAFI, M.; GHOLAMI, P. Use of intelligent business, a method for complete fulfillment of e-government, **International Journal of Computer Science and Business Informatics**. 2013.

OLIVEIRA, E; ANTUNES, C. H; GOMES, A. A comparative study of different approaches using an outranking relation in a multi-objective evolutionary algorithm. **Computers & Operations Research**, v. 40, n. 6, p. 1602-1615, 2013.

PERDIGÃO, J. Processo decisório: um estudo comparativo de tomada de decisão em organizações de segmentos distinto. In: SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA, 9., 2012, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SEGeT, 2012. v. 1.

POHEKAR S. D.; RAMACHANDRAN, M. Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning – a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, p. 2263-2278, 2009.

PORTO, M.; BANDEIRA, A. A importância dos sistemas de informações gerenciais para as organizações. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 13., 2006, Bauru. **Anais...** Bauru: SIMPEP, p. 1-12, 2006.

ROBBINS, S. P. **Comportamento Organizacional**. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2010.

SAATY, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. **International Journal of Services Sciences**, Geneve, v.1, n.1, p.83-98, 2008.

SAATY, T. L. **Método de Análise Hierárquica**. Rio de Janeiro: Makron Books, 1991.

SALOMON, V. A. P. **Contribuições para validação de tomada de decisão com múltiplos critérios**. 2010. Tese (Livre-Docência em Engenharia de Produção) - Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

SCHIMIDT, A. M. A. **Processo de apoio à tomada de decisão: abordagens AHP e Macbeth**. 1995. 197p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995.

SHIMIZU, T. **Decisão nas Organizações**. São Paulo: Atlas, 2006.

SILVA, V; SCHRAMM, F; CARVALHO, H. O uso do método PROMETHEE para seleção de candidatos à bolsa-formação do Pronatec. **International Journal of Production Research**, v. 24, n. 3, p. 548-558, 2014.

SIQUEIRA, G.; ALMEIDA, A. Aplicação do Método Electre I para Seleção de Ideias de Inovação. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 2011, Ubatuba, São Paulo. **Anais... XLIII SBPO**, Ubatuba, 2011.

SOARES, B. N. **Metodologia para priorização de investimentos em redes de distribuição de energia elétrica com foco em ganhos operacionais e financeiros**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

SONCINI, P. **Modelagem multicriterial para análise de projetos de investimento – O caso de uma distribuidora de energia elétrica**. 2008. 152p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

VAIDYA, O. S.; KUMAR, S. Analytic Hierarchy Process: an overview of applications. **European Journal of Operational Research**, v. 169, p. 3, 2006.

VON WINTERFELDT, D.; FASOLO, B. Structuring decision problems: a case study and reflections for practitioners. **European Journal of Operational Research**, v. 199, n. 3, p. 857-866, 2009.

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

WRIGHT, P.; KROLL, M. J.; PARNELL J. **Administração Estratégica**. São Paulo: Atlas, 2000.

ZELAYA, R. A. Avaliação de contratos de energia sob incerteza: uma abordagem baseada na lógica fuzzy e teoria multicritério. 2004. 141p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

3 SEGUNDO ARTIGO: TOMADA DE DECISÃO DE INVESTIMENTO ATRAVÉS DE MÉTODO MULTICRITÉRIO PARA FINS DE PLANEJAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO: PROPOSTA METODOLÓGICA E ESTUDO DE CASO

Resumo

Este artigo tem como objetivo demonstrar a aplicação da Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT) em um processo decisório de investimento para fins de planejamento da expansão do sistema de distribuição em uma concessionária distribuidora de energia elétrica. Com a aplicação do método fica evidenciada a importância de um procedimento formal para auxiliar os decisores na hierarquização de forma objetiva dos alimentadores de energia elétrica mais críticos, proporcionando maior clareza e aprendizado em todo o processo de planejamento da expansão do sistema elétrico. Desenvolveu-se uma ferramenta para tratamento do grande volume de dados; esta disponibiliza as informações depuradas para auxiliar na tomada decisão de investimento em ações eficientes, que melhorem a qualidade do fornecimento e atendam o crescimento do sistema.

Palavras-chave: análise multicritério, MAUT, ferramenta de apoio à decisão, planejamento da expansão da distribuição.

3.1 Introdução

A energia elétrica tem papel fundamental para vida da sociedade contemporânea, tornando-se um insumo essencial para competitividade econômica mundial e ainda extremamente importante para elevar o padrão de vida da população. O sistema elétrico brasileiro de potência é responsável pela geração, transmissão e distribuição de energia elétrica e pertence a empresas estatais, privadas e permissionárias regionais (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010). Ao longo dos anos, muitos foram os investimentos nas áreas de geração e transmissão, uma vez que qualquer falha tende a afetar um número muito maior de consumidores do que uma falha na distribuição, o que acabou fazendo com essas áreas apresentassem um grande desenvolvimento, em detrimento do sistema de distribuição (FERRET, 2012).

Segundo estudos da área, estima-se que cerca de 80% das falhas em sistemas de potência estão associadas a elementos pertencentes a sistemas de distribuição (TSAO;

CHANG, 2003). Por isso, o órgão regulador do setor elétrico, a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), vem impondo um forte regramento e constante pressão com metas arrojadas de indicadores de qualidade do serviço, para que as concessionárias de energia elétrica busquem intensamente a eficácia da aplicação de seus recursos operacionais e financeiros, a fim de eliminar os desperdícios e a má gestão dos seus ativos (SONCINI, 2008).

Pinto (2008) destaca que com a reestruturação do sistema elétrico em 1996, as companhias de energia elétrica passaram a ser remuneradas ou penalizadas, monetariamente, em relação ao seu desempenho. Por este motivo, as concessionárias passaram a dar mais atenção aos índices de eficiência de sua operação e a priorização de seus investimentos. Assim, no cenário atual elas estão diante do constante desafio de alocar os limitados recursos disponíveis de maneira eficaz, com o objetivo de mitigar os riscos regulatórios e prestar um serviço de qualidade e excelência, mediante, entre outras coisas, da otimização da aplicação dos recursos através de sua adequada priorização.

Uma das atividades que demanda grande parcela de investimento das empresas de distribuição de energia elétrica é o planejamento da expansão do sistema. Os projetos de expansão consomem grande parte dos escassos recursos disponíveis; assim, na busca por um melhor desempenho, as empresas procuram ferramentas de auxílio à tomada de decisão que contemplem aspectos técnicos e econômicos na definição das prioridades de investimento para expansão do sistema (VARGAS, 2015).

A elaboração do planejamento da expansão do sistema elétrico é realizado quando este se aproxima dos seus limites máximos de operação. Como a expansão pode ser executada de diversas maneiras, surge, então, a necessidade de encontrar a melhor solução de custo-benefício, que possibilite que as empresas continuem atuando de forma eficaz e lucrativa (MOREIRA, 2009). Diante do número de variáveis envolvidas e levando-se em consideração a complexidade do sistema de distribuição na identificação de prioridades e do nível de criticidade de seus ativos, a utilização de métodos multicritérios de apoio à decisão é de extrema relevância para identificar onde os escassos recursos devem ser aplicados, para que se tenha o maior benefício possível (CANDIAN, 2008).

O objetivo geral deste artigo é identificar os alimentadores mais críticos para expansão do sistema de distribuição, de forma a priorizar ações de investimento no processo decisório da concessionária de distribuição de energia elétrica através do uso de método multicritério de apoio à decisão. O objetivo deste trabalho é a aplicação da Teoria da Utilidade Multiatributo

(MAUT) no processo decisório de investimento para fins de planejamento da expansão da distribuição em uma concessionária distribuidora de energia elétrica. Com essa aplicação, pretende-se (i) auxiliar os decisores na hierarquização dos alimentadores de forma objetiva, para fins de priorização de ações de investimento, e (ii) proporcionar maior clareza e aprendizado em todo o processo, possibilitando analisar quais as ações de curto, médio e longo prazo devem ser priorizadas no plano de necessidades para melhorar as condições atuais dos alimentadores mais críticos.

Para tratar a grande quantidade de informações envolvida no processo decisório, desenvolveu-se ferramenta de apoio à decisão no *Microsoft Office Excel*. A ferramenta possibilita aplicar o método MAUT para uma grande quantidade de alimentadores, utilizando-se de informações de diferentes fontes, de maneira organizada, para priorizar ações nos alimentadores mais críticos da empresa distribuidora de energia elétrica.

A estrutura deste artigo é formada por 4 seções, incluindo a presente introdução. Na seção 2, é apresentado o referencial teórico dividido em duas partes: na primeira, define-se o processo de planejamento da expansão; na segunda, aborda-se de forma sucinta os métodos multicritério de apoio à decisão, com foco nas etapas do método MAUT. A seção 3 traz o estudo de caso em uma concessionária de energia elétrica, onde reporta-se a utilização do método MAUT na hierarquização de alimentadores do sistema de distribuição, considerando diversos critérios. Nesta seção também é apresentada a ferramenta de apoio à decisão que permite de forma amigável e organizada manipular relatórios e informações de fontes distintas, e hierarquizar uma grande quantidade de alimentadores. As conclusões quanto à nova ferramenta disponibilizada para auxiliar os especialistas na tomada de decisão estão na seção 4.

3.2 Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição Apoiado em Método Multicritério

A evolução e revisão da legislação do setor elétrico existente faz com que as distribuidoras de energia aumentem seus esforços para garantir os níveis adequados de qualidade do serviço entregue aos seus consumidores. Por consequência, as empresas vêm adotando estratégias de manutenção e expansão do sistema de forma a atender à necessidade do mercado, respeitando as restrições orçamentárias da companhia (VARGAS, 2015).

Devido ao elevado número de unidades consumidoras e grandes extensões de rede, característica marcante dos sistemas de distribuição no Brasil, torna-se praticamente impossível atender, em curto prazo, todas as necessidades diagnosticadas, tendo em vista os

recursos muitas vezes limitados. Assim, é necessário que as empresas priorizem seus investimentos levando em consideração o custo-benefício e distribua-os no horizonte de estudo do setor de planejamento (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010).

Entretanto, além das ações com a finalidade de manter os indicadores de qualidade dentro dos limites regulatórios através do planejamento e execução de uma rotina de manutenção nos ativos da distribuidora, existe uma preocupação quanto ao crescimento da carga, visando manter a qualidade do produto e do serviço em condições técnicas adequadas. Desta forma, o planejamento do sistema de distribuição deve ser realizado anualmente, em dois diferentes horizontes: para o Sistema de Distribuição de Alta Tensão (SDAT) o horizonte é de 10 anos; para e o Sistema de Distribuição de Média Tensão (SDMT) é de 5 anos (ANEELa, 2016).

O estudo do SDAT apresenta informações para o planejamento de linhas de transmissão e de subestações de energia, que estão conectadas com a rede básica e com as Demais Instalações de Transmissão (DIT). Já o estudo do SDMT apresenta o estado das linhas de distribuição e as obras necessárias para sua expansão e manutenção (ANEELa, 2016).

O planejamento da expansão do sistema de distribuição se inicia através da realização de um diagnóstico do desempenho do sistema elétrico baseado no histórico de medições dos equipamentos supervisionados. O objetivo, de forma geral, é retratar o cenário de máxima demanda em todos os patamares de carga, observando o comportamento de grandezas como o nível de tensão, carregamento e perdas elétricas em regime permanente. Essa análise permite verificar a condição dos alimentadores e determinar seu desempenho, através de critérios estabelecidos pela empresa e agente regulador (GONEN, 2008).

Uma das principais dificuldades na elaboração do planejamento da distribuição é identificar e determinar o local onde devem ser feitas as melhorias, levando-se em consideração a carga a ser atendida e as situações socioeconômicas e políticas (MARTINS, 2009). Neste contexto, identificar o alimentador para o qual será feito o planejamento torna-se de extrema importância. Todo este processo é desenvolvido através do auxílio de softwares de simulação de fluxo de potência, da importação de informações da base de cadastro georeferenciada da empresa, somada aos dados de faturamento de consumidores, geração de usinas conectadas no sistema e curvas típicas de consumidores de baixa tensão, entre outros (CANDIAN, 2008).

A conclusão do diagnóstico permite a identificação das necessidades do sistema elétrico, onde se inicia o planejamento propriamente dito. De acordo com Candian (2008), o planejamento consiste em um estudo baseado nas projeções de crescimento de demanda ao longo dos anos, de modo a se obter prognósticos de curto, médio e longo prazo sobre as condições de operação dos sistemas elétricos. Diante desse cenário complexo, com grande volume de dados, é de extrema importância ser eficaz e veloz na identificação dos alimentadores com pior desempenho, com intuito de direcionar ações para adequação dos mesmos.

Neste contexto, os métodos multicritério de apoio à decisão tornam-se interessantes, pois possibilitam a incorporação de uma grande quantidade de critérios quantitativos e qualitativos, permitindo-se analisar e propor soluções de maneira eficaz e veloz (TCHEMRA, 2009). Conforme Neves e Barbosa (2014), existem atualmente uma grande variedade de métodos multicritério de apoio à decisão desenvolvidos para auxiliar o tomador de decisão; destacam-se o AHP, o MAUT e o ELECTRE. Estes métodos podem ser utilizados para resolver uma grande gama de problemas onde uma decisão significativa precisa ser feita (ISHIZAKA; NEMERY, 2013). Cada método apresenta características, finalidades e funcionamentos diferentes; sendo assim, cabe ao decisor analisar e identificar o melhor método para seu problema.

Para o desenvolvimento deste artigo foi escolhida a Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT – *Multi-Attribute Utility Theory*), em virtude das diversas características destacadas por Guglielmetti, Marins e Salomon (2003) e Shimizu (2006), tais como: (i) proporcionar ranking completo de alternativas; (ii) permitir avaliação da consistência dos julgamentos; (iii) facilidade de utilização em grupo; (iv) facilidade na estruturação do problema; (v) estrutura que permite o rápido aprendizado; (vi) transparência no processamento e nos resultados; e (vii) estrutura que permite trabalhar com grande número de julgamentos e tratar quantitativamente um conjunto de variáveis qualitativas.

O método contribui ainda para a resolução de conflitos com o aumento da transparência, proporcionando maior facilidade na obtenção do consenso (HOSTMANN *et al.*, 2005). Além disso, todos os pressupostos da estrutura axiomática (ordenabilidade e transitividade) do método são consistentes com o problema a ser estudado.

3.2.1 O método MAUT

O método MAUT é um modelo matemático utilizado para representar a preferência do decisor pelas alternativas candidatas à resolução de um problema decisório (MIN, 1994). Esse

modelo permite criar uma nova escala, chamada de escala de utilidade, que determina para cada alternativa um valor utilidade, também chamado de *score* ou pontuação global, estabelecido em relação a critérios pré-estabelecidos pelo decisor (ISHIZAKA; NEMERY, 2013).

Conforme Gomes, Gomes e Almeida (2002), existem diversas variações do método MAUT; a maioria das aplicações do método envolve o uso de uma função utilidade aditiva, permitindo que as contribuições individuais dos critérios possam ser somadas, conforme apresentado na equação (8).

$$U(a) = \sum_{i=1}^n k_i u_i(a) \quad (8)$$

onde:

- $U(a)$ - é o valor ou pontuação global da alternativa a ;
- k_i - é o peso do critério i ;
- $u_i(a)$ - é o desempenho da alternativa a frente ao critério i

Estabelecida a utilização da função utilidade aditiva, Gomes, Araya e Cirignano (2011) elencam sete etapas como principais para aplicação do método MAUT. Primeiramente é preciso identificar os objetivos, as metas de decisão e o escopo do problema. Após esta etapa, é recomendado realizar a definição dos critérios utilizando a técnica de *brainstorming*, para posteriormente definir quais são as alternativas que serão avaliadas.

Ultrapassadas as três etapas iniciais de definições, deve-se quantificar o desempenho de cada alternativa em relação a cada critério utilizando escala de 0 a 100; os valores devem ser normalizados para que fiquem no intervalo entre zero e um (ISHIZAKA; NEMERY, 2013). Para tal, utilizam-se as equações (9) e (10).

Para maximizar o critério (valor mais alto é o melhor):

$$u_{ai}'(a) = \frac{u_{ai}(a) - \min(u_{ai})}{\max(u_{ai}) - \min(u_{ai})} \quad (9)$$

Para minimizar o critério (valor menor é o melhor):

$$u_{ai}'(a) = 1 + \frac{\min(u_{ai}) - u_{ai}(a)}{\max(u_{ai}) - \min(u_{ai})} \quad (10)$$

onde:

- $u_{ai}'(a)$ - é o valor normalizado do atributo a do critério i ;
- $u_{ai}(a)$ - é o valor do atributo a do critério i ;

- $\min(u_{ai})$ - é o valor mínimo de todos os atributos para o critério i ;
- $\max(u_{ai})$ - é o valor máximo de todos os atributos para o critério i .

Na etapa seguinte, é necessário que os critérios escolhidos sejam avaliados e que sejam atribuídos pesos a eles. A técnica de ponderação escolhida é o *Swing Weight*, que é utilizada com frequência em conjunto com o MAUT (FRENCH *et al.*, 2005) e facilita a compreensão dos *stakeholders*, clarificando o impacto da importância relativa dos pesos nos resultados (TRAINOR *et al.*, 2007).

O *Swing Weight* é uma técnica que pode ser utilizada em praticamente qualquer situação de mensuração de pesos e tem como grande vantagem a construção intuitiva. O decisor define uma situação de *benchmark* e ordena os critérios de maneira decrescente, atribuindo pontos para cada um (CLEMEN; REILLY, 2001).

A primeira etapa da aplicação do *Swing Weight* é estabelecer uma referência (*benchmark*), definida pela pior situação possível. Em seguida, o decisor deve dar notas aos critérios, começando pelo mais importante. O passo seguinte é identificar o segundo critério mais importante e atribuir uma nota menor a que foi atribuída ao critério já escolhido e assim, sucessivamente, até que todos os critérios tenham recebido uma nota (VIEIRA; ALMEIDA, 2004). A última etapa consiste em calcular o peso de cada critério, através da equação (11).

$$\text{Peso Critério} = \frac{\text{Nota Critério}}{\text{Soma das Notas dos Critérios}} \quad (11)$$

Ao final, utilizando-se da função de utilidade multiatributo na equação (8), determina-se o valor utilidade ou pontuação global de cada alternativa, obtida pelo somatório do produto do peso de cada critério pelo desempenho de cada alternativa. A melhor alternativa é aquela que apresentar o maior valor ou pontuação global.

Após a obtenção dos resultados, Belton e Stewart (2002) afirmam que é necessário realizar uma análise de sensibilidade, com o intuito de verificar se as conclusões preliminares são suficientemente sólidas (análise de robustez), ou se são muito sensíveis a determinadas mudanças nas variáveis do modelo.

Em síntese, a análise de sensibilidade permite avaliar se a estrutura e o conteúdo do modelo são suficientemente apropriados para resolver o problema em questão. Sua aplicação é necessária para verificar possíveis incoerências que possam conduzir a diferentes decisões (CLEMEN; REILLY, 2001). A análise de sensibilidade é habitualmente utilizada para medir analiticamente o impacto da incerteza nos resultados do modelo de decisão (MUSTAJOKI; HAMALAINEN; LINDSTEDT, 2006).

3.3 Estudo de caso

O estudo de caso apresentado nesse trabalho é realizado através da análise das características e desempenho das redes de distribuição primária, ou de média tensão, oriundas das subestações de distribuição e denominadas como circuitos alimentadores de distribuição de energia elétrica. Juntos, os alimentadores correspondem ao sistema de distribuição de média tensão (SDMT) de uma empresa distribuidora de energia elétrica.

O SDMT deve atender os consumidores de energia presentes em regiões urbanas e rurais, o que determina a característica de cada sistema. Os alimentadores da zona urbana, por exemplo, geralmente apresentam densidade de carga elevada, atendendo basicamente escritórios, lojas, residências e, em alguns casos, empresas com cargas elevadas. Têm períodos de funcionamento bem definidos e seu crescimento de carga é praticamente vegetativo, devido ao surgimento ou aquisição de novos equipamentos elétricos (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010).

Os alimentadores rurais têm como particularidade a baixa densidade de carga, com consumidores residenciais e agroindustriais com hábitos de consumo diferentes dos demais. Caracterizam-se pela extensão de rede, o que indica em casos de cargas elevadas a necessidade de equipamentos reguladores de tensão para manter a qualidade do produto adequada.

O trabalho foi desenvolvido em uma empresa concessionária de serviço público de distribuição de energia elétrica localizada no estado do Rio Grande do Sul, atuando na região Metropolitana e Centro Oeste do estado. Atualmente atende a 118 municípios, totalizando cerca de 1,3 milhões de unidades consumidoras dentro de uma área de concessão de 99.512 km². Possui ainda cerca de 2 mil km em linhas de distribuição de alta tensão, 65 mil km em linhas de distribuição de média tensão e em torno de 62 mil transformadores de distribuição.

Os 65 mil km em linhas de distribuição de média tensão correspondem ao SDMT desta concessionária de energia e estão divididos entre 469 alimentadores. Portanto, essa grande quantidade de circuitos alimentadores gera um desafio no momento de identificar quais são os mais críticos e na priorização dos que devem receber investimento prioritariamente, levando-se em consideração o objetivo de expandir o sistema de distribuição com qualidade e confiabilidade.

O planejamento da expansão do SDMT é realizado seguindo etapas de diagnóstico, prognóstico, análise e definição de soluções e consolidação do plano de obras a ser executado.

A etapa de diagnóstico do SDMT tem por objetivo retratar o cenário de máxima demanda em todos os patamares de carga dos alimentadores, observando aspectos como nível de tensão, carregamento, indicadores de continuidade e demais grandezas elétricas em regime permanente. Desta forma, é possível examinar se o desempenho dos alimentadores está de acordo com o determinado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) com relação à qualidade do fornecimento de energia. O diagnóstico é extremamente importante, pois relaciona, além do desempenho, as características de cada alimentador. Muitos desses dados serão *inputs* no processo de hierarquização dos alimentadores da distribuidora.

Concluída a etapa de definição do escopo do trabalho e dos objetivos, para a aplicação do MAUT devem ser identificados os critérios e subcritérios relevantes para a análise que se pretende fazer. Para tanto, foi realizado um evento de *brainstorming* com os especialistas da empresa distribuidora de energia. Os critérios foram avaliados considerando os seguintes fatores sugeridos por Roy (2005):

- Completude: todos os critérios relevantes foram contemplados;
- Operacionalidade: os critérios são suficientemente específicos nos níveis mais baixos da hierarquia;
- Decomponibilidade: pode-se avaliar o desempenho de uma alternativa em relação a um critério, independente do seu desempenho em relação a outros critérios;
- Ausência de Redundância: um critério não pode representar a mesma realidade que outro, mesmo que seja parcialmente;
- Tamanho Mínimo: deve-se assegurar que os critérios não sejam decompostos além do nível em que podem ser avaliados;
- Legibilidade: o que cada critério mede ou representa deve ser compreensível para todos os envolvidos no processo decisório;
- Monotônica: a ordenação das preferências parciais, representadas pela avaliação ou julgamento de cada critério, deve ser consistente com a ordenação das preferências globais expressas sobre as alternativas;
- Comparabilidade: a hierarquia de critérios estabelecida deve possibilitar, de forma legítima, a comparação de subgrupos de critérios.

No evento de *brainstorming* para avaliação dos critérios e subcritérios relevantes para o trabalho proposto, foram convidados especialistas da empresa distribuidora de energia com experiência no setor elétrico e na área de planejamento, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5: Especialistas convidados

Cargo	Formação	Área de Atuação	Experiência no Setor Elétrico
Especialista em Distribuição	Doutorando em Engenharia Elétrica	Perdas Técnicas	25 anos
Engenheiro Sênior	Engenheiro Eletricista	Planejamento da Transmissão	10 anos
Engenheiro Sênior	Mestrando em Engenharia de Produção	Planejamento da Distribuição	10 anos
Engenheiro Júnior	Mestre em Engenharia Elétrica	Planejamento da Distribuição	5 anos
Engenheiro Pleno	Doutorando em Engenharia Elétrica	Planejamento da Operação do Sistema	17 anos
Engenheiro Sênior	Mestre em Engenharia Elétrica	Engenharia	12 anos
Especialista em Distribuição	Mestre em Engenharia Elétrica	Regulação e Tarifas	31 anos

Fonte: Elaborada pelo Autor (2017)

Durante a reunião, identificou-se uma série de critérios que tem influência nas características e desempenho dos alimentadores. Feito isto, foi realizada nova reunião onde todas as sugestões foram reavaliadas pelo grupo, para então consolidar o resultado final. Os critérios considerados redundantes ou irrelevantes foram descartados, concluindo-se pela seleção de 7 critérios e 16 subcritérios, apresentados a seguir:

1. Carregamento: trata-se do critério que correlaciona a utilização de condutores e equipamentos acima da capacidade nominal com a quantidade de clientes e extensão de rede impactados.
 - 1.1. Carregamento na troncal: subcritério que diz respeito à relação percentual de corrente pela capacidade nominal do condutor da troncal do alimentador, em amperes.
 - 1.2. Quantidade de equipamentos especiais em sobrecarga (RT e TR): subcritério definido como a soma da quantidade de equipamentos de regulação de tensão e/ou transformadores elevadores/rebaixadores de potência operando acima de 80% da sua capacidade nominal.
 - 1.3. Quantidade de clientes afetados por sobrecarga no alimentador: subcritério definido como a soma da quantidade de clientes a jusante do último trecho impactado por sobrecarga no alimentador.
 - 1.4. Extensão do trecho sobrecarregado da troncal: subcritério definido pela extensão total em km da troncal do alimentador sobrecarregada.

2. Queda de tensão: trata-se de um critério de qualidade, que apresenta o nível de tensão nos alimentadores e o impacto em clientes e estações primárias.
 - 2.1. Nível de tensão no pior trecho: subcritério que indica o nível da tensão no ponto com maior queda de tensão em pu (por unidade, de uma grandeza com sua base de referência); portanto, quanto menor o valor maior a queda de tensão.
 - 2.2. Quantidade de clientes no trecho com nível de tensão precário: subcritério definido como a soma de clientes conectados em trechos com tensão precária ($0,90 \text{ pu} \leq \text{tensão nominal} < 0,93 \text{ pu}$; ANEELb, 2016).
 - 2.3. Quantidade de clientes no trecho com nível de tensão crítico: subcritério definido como a soma dos clientes conectados em trechos com tensão crítica ($\text{tensão nominal} < 0,90$ ou $\text{tensão nominal} > 1,05 \text{ pu}$; ANEELb, 2016).
 - 2.4. Quantidade de equipamentos para regular a tensão: subcritério definido como a soma da quantidade de equipamentos para regular a tensão no alimentador.
 - 2.5. Quantidade de EPs no trecho com nível de tensão precário: subcritério definido como a soma das estações primárias conectadas em trechos com tensão precária ($0,90 \text{ pu} \leq \text{tensão nominal} < 0,93 \text{ pu}$; ANEELb, 2016).
 - 2.6. Quantidade de EPs no trecho com nível de tensão crítico: subcritério definido como a soma das estações primárias conectadas em trechos com tensão crítica ($\text{tensão nominal} < 0,90$ ou $\text{tensão nominal} > 1,05 \text{ pu}$; ANEELb, 2016).
3. Quantidade total de clientes do alimentador: subcritério definido como a quantidade total de clientes no alimentador.
 - 3.1. Quantidade de clientes total do alimentador: subcritério com a quantidade total de clientes no alimentador.
 - 3.2. Quantidade de clientes importantes no alimentador: subcritério definido como a quantidade de clientes importantes (grandes clientes, hospitais, atendimento a serviços públicos, etc.).
4. Perdas no alimentador: critério dado pela soma da perda de demanda expressa em kW no período de carga máxima do alimentador.
5. Demanda reprimida AL com problema na distribuição: critério definido como a soma da demanda requisitada por novos e/ou aumentos de carga no alimentador, porém somente podem ser liberadas mediante determinada ação (manobra, recondutoramento, novo equipamento, etc.).

6. Extensão alimentador: critério que caracteriza o alimentador, indicado em km; soma de todos os trechos de média tensão.
7. Performance: critério que agrupa subcritérios que indicam o desempenho nos últimos 12 meses do alimentador, referente ao não fornecimento de energia e multas realizadas a clientes conectados no alimentador.
 - 7.1. FEC: subcritério definido como a quantidade média de vezes em que o fornecimento de energia elétrica aos clientes de determinado alimentador foi interrompido nos últimos 12 meses (ANEELb, 2016).
 - 7.2. DEC: subcritério definido como a duração média equivalente de horas que clientes de determinado alimentador permaneceram sem o fornecimento de energia elétrica nos últimos 12 meses (ANEELb, 2016).
 - 7.3. DM: subcritério com a duração média de interrupção de determinado alimentador, representado pela razão DEC/FEC nos últimos 12 meses.
 - 7.4. Multas: subcritério definido como a soma de ressarcimento em reais realizada nos últimos 12 meses a clientes conectados a um determinado alimentador.

Com os critérios estabelecidos, foram atribuídas notas aos mesmos, utilizando a técnica *Swing Weight*. Sete especialistas da distribuidora de energia realizaram a avaliação, escolhidos por seus conhecimentos sobre o funcionamento da rede de distribuição e do processo de planejamento da empresa. Cada especialista recebeu, em separado, um formulário (ver Apêndice A), e o preencheu sem conhecimento das notas atribuídas pelos outros especialistas. As notas utilizaram uma escala de 0 a 100.

A Tabela 6 traz os pesos atribuídos a cada critério por cada especialista.

Tabela 6: Notas atribuídas pelos especialistas nos critérios e subcritérios

Especialista	1	2	3	4	5	6	7
Critérios	Nota	Nota	Nota	Nota	Nota	Nota	Nota
1 - Carregamento	85	80	85	30	70	85	100
2 - Queda de Tensão	100	100	100	90	70	100	90
3 - Quantidade de clientes do alimentador	50	40	60	60	20	50	75
4 - Perdas no alimentador	30	50	30	85	30	30	50
5 - Demanda reprimida AL com problema na distribuição	25	85	70	100	100	20	80
6 - Extensão alimentador	20	30	50	40	5	48	20
7 - Performance	10	70	65	10	70	18	60

Fonte: Elaborada pelo Autor (2017)

As tabelas 6 a 9 trazem os pesos atribuídos a cada subcritério por cada especialista.

Tabela 7: Notas atribuídas pelos especialistas aos subcritérios do carregamento

Especialista	1	2	3	4	5	6	7
1 - Carregamento	Nota	Nota	Nota	Nota	Nota	Nota	Nota
1.1 - Sobrecarga na troncal	100	100	100	90	60	100	100
1.2 - Quantidade de equipamentos especiais em sobrecarga (RT e TR)	30	80	50	70	60	60	75
1.3 - Quantidade de clientes afetados por sobrecarga no alimentador	60	60	60	60	100	50	25
1.4 - Extensão do trecho sobrecarregado da troncal	50	30	40	100	90	40	50

Fonte: Elaborada pelo Autor (2017)

Tabela 8: Notas atribuídas pelos especialistas aos subcritérios de queda de tensão

Especialista	1	2	3	4	5	6	7
2 - Queda de Tensão	Nota	Nota	Nota	Nota	Nota	Nota	Nota
2.1 - Nível de tensão no pior trecho	100	100	50	60	100	100	80
2.2 - Quantidade de clientes no trecho com nível de tensão precário	60	80	85	80	70	30	40
2.3 - Quantidade de clientes no trecho com nível de tensão crítico	55	90	95	100	90	60	100
2.4 - Quantidade de equipamentos para regular a tensão	70	50	60	90	50	50	50
2.5 - Quantidade de EPs no trecho com nível de tensão precário	58	60	90	50	70	40	20
2.6 - Quantidade de EPs no trecho com nível de tensão crítico	53	70	100	70	90	70	60

Fonte: Elaborada pelo Autor (2017)

Tabela 9: Notas atribuídas pelos especialistas aos subcritérios de quantidade de clientes

Especialista	1	2	3	4	5	6	7
3 - Quantidade de clientes	Nota	Nota	Nota	Nota	Nota	Nota	Nota
3.1 - Quantidade de clientes total do alimentador	80	100	80	90	80	100	100
3.2 - Quantidade de clientes importantes do alimentador	100	60	100	100	100	70	50

Fonte: Elaborada pelo Autor (2017)

Tabela 10: Notas atribuídas pelos especialistas aos subcritérios de performance

Especialista	1	2	3	4	5	6	7
7 – Performance	Nota	Nota	Nota	Nota	Nota	Nota	Nota
7.1 - FEC	100	100	100	80	90	100	80
7.2 - DEC	95	20	95	90	70	90	100
7.3 - DM (duração média de interrupção)	50	70	85	70	20	30	40
7.3 - Multas	90	40	90	100	100	70	60

Fonte: Elaborada pelo Autor (2017)

Após o preenchimento das notas pelos especialistas, utilizou-se a equação (11) para calcular o peso de cada critério e subcritério. Em seguida, calculou-se a média geométrica das notas, que se aplica melhor neste caso, pois cada um desses critérios e subcritérios possuem diferentes escalas numéricas (COSTA; BELDERRAIN, 2009). As tabelas 10 a 14 trazem os pesos finais dos critérios e subcritérios, referentes às médias geométricas, além do *ranking* dos itens. Os pesos foram normalizados tal que a soma em cada tabela resulta em 1,0 e serão utilizados na aplicação do MAUT.

Tabela 11: Peso dos critérios

Critérios	Ranking	Peso
1 - Carregamento	2	0,18831
2 - Queda de Tensão	1	0,22879
3 - Quantidade de clientes do alimentador	4	0,12496
4 - Perdas no alimentador	5	0,10736
5 - Demanda reprimida AL com problema na distribuição	3	0,16895
6 - Extensão alimentador	7	0,07497
7 – Performance	6	0,10665

Fonte: Elaborada pelo Autor (2017)

Tabela 12: Peso dos subcritérios de carregamento

Subcritérios	Ranking	Peso
1 - Carregamento		
1.1 - Sobrecarga na troncal	1	0,34392
1.2 - Quantidade de equipamentos especiais em sobrecarga (RT e TR)	2	0,22487
1.3 - Quantidade de clientes afetados por sobrecarga no alimentador	3	0,21958
1.4 - Extensão do trecho sobrecarregado da troncal	4	0,21164

Fonte: Elaborada pelo Autor (2017)

Tabela 13: Peso dos subcritérios de queda de tensão

Subcritérios 2 - Queda de Tensão	Ranking	Peso
2.1 - Nível de tensão no pior trecho	1	0,20027
2.2 - Quantidade de clientes no trecho com nível de tensão precário	4	0,15105
2.3 - Quantidade de clientes no trecho com nível de tensão crítico	1	0,20027
2.4 - Quantidade de equipamentos para regular a tensão	5	0,14257
2.5 - Quantidade de EPs no trecho com nível de tensão precário	6	0,1317
2.6 - Quantidade de EPs no trecho com nível de tensão crítico	3	0,17413

Fonte: Elaborada pelo Autor (2017)

Tabela 14: Peso dos subcritérios de quantidade de clientes

Subcritérios 3 - Quantidade de clientes	Ranking	Peso
3.1 - Quantidade de clientes total do alimentador	1	0,52066
3.2 - Quantidade de clientes importantes do alimentador	2	0,47934

Fonte: Elaborada pelo Autor (2017)

Tabela 15: Peso dos subcritérios de performance

Critérios e Subcritérios 7 - Performance	Ranking	Peso
7.1 - FEC	1	0,30588
7.2 - DEC	2	0,26353
7.3 - DM (duração média de interrupção)	4	0,17176
7.3 - Multas	3	0,25882

Fonte: Elaborada pelo Autor (2017)

Concluída a etapa de definição das notas e pesos dos critérios e subcritérios, tem início a etapa de tratamento dos dados. Tal etapa é complexa, devido ao grande volume de informações dos critérios e subcritérios requeridas sobre os 469 alimentadores da concessionária de energia. Para compor tais necessitam-se *inputs* de sistemas distintos da empresa, conforme apresentado na Tabela 16. Estes *inputs* são realizados através de relatórios extraídos dos sistemas listados e as informações de cada relatório são tratadas e normalizadas para aplicação do método.

Tabela 16: Sistemas consultados para obter inputs de critérios e subcritérios do planejamento do sistema de distribuição de média tensão

Sistemas Consultados	Critérios/Subcritérios
Sistema Georeferenciado	6
Sistema de Gestão Comercial	3.1; 3.2
Dados Técnicos (SAP)	2.4
Sistema de Gestão de Incidências	7.1; 7.2; 7.3; 7.4
Informações Supervisão dos Equipamentos Elétricos	1.2; 5
Software de Fluxo de Potência	1.1; 1.3; 1.4; 2.1; 2.2; 2.3; 2.5; 2.6; 4

Fonte: Elaborada pelo Autor (2017)

Com as informações referentes a cada alimentador, realizou-se o tratamento dos dados. Foram obtidos valores utilidade para cada alimentador, os quais servem como orientação para hierarquizar os alimentadores, identificando-se assim os ativos mais críticos para distribuidora. A Tabela 17 apresenta o valor utilidade dos 30 alimentadores mais críticos.

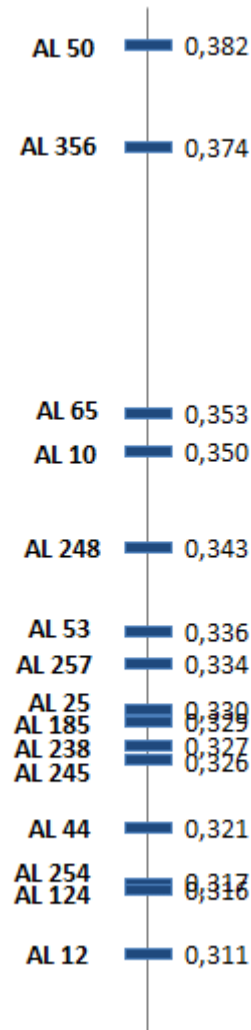
Tabela 17: Hierarquização dos 30 alimentadores com maior valor utilidade

Posição na Priorização	Alimentador	Valor Utilidade
1	AL 50	0,38202
2	AL 356	0,37409
3	AL 65	0,35331
4	AL 10	0,35031
5	AL 248	0,34281
6	AL 53	0,33627
7	AL 257	0,33372
8	AL 25	0,33015
9	AL 185	0,32930
10	AL 238	0,32733
11	AL 245	0,32619
12	AL 44	0,32098
13	AL 354	0,31668
14	AL 124	0,31612
15	AL 12	0,31115
16	AL 309	0,30221
17	AL 178	0,28985
18	AL 47	0,28810
19	AL 232	0,28582
20	AL 251	0,28434
21	AL 201	0,28176
22	AL 283	0,27893
23	AL 91	0,27851
24	AL 247	0,27535
25	AL 51	0,27282
26	AL 274	0,27259
27	AL 127	0,27207
28	AL 375	0,27125
29	AL 214	0,27066
30	AL 135	0,26992

Fonte: Elaborada pelo Autor (2017)

Observa-se que o alimentador mais crítico, levando em consideração os critérios estabelecidos, é o alimentador 50, com um valor utilidade de 0,382. A partir do *ranking* de alimentadores, identifica-se a distância entre eles através do gráfico de utilidade. A Figura 4 ilustra as distâncias entre os 15 alimentadores mais críticos. Observa-se que os alimentadores 50 e 356 estão distantes do terceiro colocado (alimentador 65), sendo, portanto, alimentadores a serem priorizados quanto a investimentos, de acordo com a metodologia proposta com foco na expansão do sistema. Observa-se também que os alimentadores 25, 185, 238 e 245 estão próximos no gráfico; neste caso, requer-se uma análise mais apurada para concluir sobre a criticidade e alternativas de investimento para esses ativos.

Figura 4: Valor utilidade dos 15 primeiros alimentadores



Fonte: Elaborada pelo Autor (2017)

Para avaliar o grau de confiabilidade dos resultados apresentados neste estudo, realizou-se primeiramente a validação dos resultados com os especialistas, após foi realizada uma análise de sensibilidade. A análise consiste em simular alterações nos pesos dos critérios mais significativos. As alterações permitem verificar a sensibilidade do *ranking* atual de alternativas a mudanças nos pesos aplicados (TRIANTAPHYLLOU, 2000). A análise de sensibilidade visa determinar se algum parâmetro exerce influência crítica na aplicação prática da função multiatributo, ou seja, se uma pequena mudança em um peso relativo de atributo pode provocar nova ordem global de preferências (BELTON E STEWART, 2002). Caso a alteração no *ranking* seja pequena, a incerteza pode ser ignorada (BROWN, 2005).

Os dois critérios com maior peso são Queda de Tensão (22,88%) e Carregamento (18,83%). Na análise de sensibilidade, simulou-se o seguinte cenário alternativo:

- Cenário Alternativo: o peso do critério Queda de Tensão (22,88%) foi substituído pelo peso do critério Carregamento (18,83%).

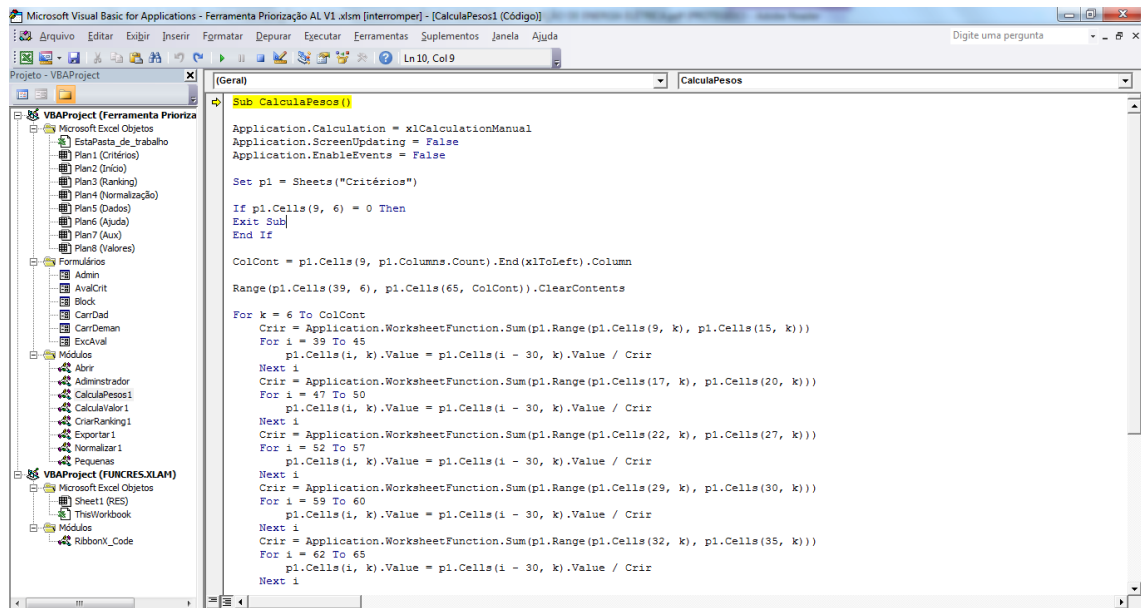
O cenário alternativo não alterou o posicionamento dos três primeiros colocados no *ranking*. Os 30 alimentadores com maior valor utilidade mantiveram-se os mesmos, apesar de 23 sofrerem alteração de até três posições no *ranking*, o que não é considerado relevante num universo de 469 alimentadores. A análise de sensibilidade comprovou, assim, a consistência da função multiatributo aplicada no processo.

De posse da hierarquização e do gráfico de valor, cabe aos engenheiros de planejamento avaliarem os alimentadores com maior valor utilidade e elencar ações de curto, médio e longo prazo a serem priorizadas no plano de necessidades, para melhorar a condição atual destes alimentadores. A utilização do MAUT na priorização dos alimentadores baseados em critérios técnicos possibilitou a identificação de ações alinhadas a esses critérios, porém gerando cenários de grande incremento de investimento, portanto sendo necessária uma avaliação de custo benefício.

3.4 Ferramenta

Diante da complexidade e volume de dados envolvidos na hierarquização dos alimentadores para fins de planejamento, e buscando-se facilitar a aplicação do uso do MAUT, desenvolveu-se uma ferramenta computacional de apoio usando a planilha *Excel*. Para a etapa de depuração e tratamento dos dados foi utilizada uma das ferramentas do *Excel*, denominada *Visual Basic for Applications* (VBA), que disponibiliza a criação de linhas de código de programação permitindo a automatização de relatórios. Uma visão parcial da programação em VBA está apresentada na Figura 5.

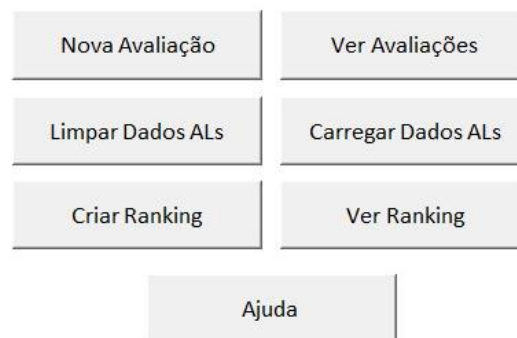
Figura 5: Tela da plataforma do Visual Basic for Applications (VBA)



Fonte: Elaborada pelo Autor (2017)

Na tela inicial da ferramenta de priorização é apresentado o menu de navegação com os principais comandos (ver Figura 7).

Figura 6: Tela inicial da ferramenta de priorização



Fonte: Elaborada pelo Autor (2017)

A ferramenta permite a inclusão de novas avaliações de especialistas com as respectivas notas aos critérios e subcritérios estabelecidos, conforme Figura 7. Salienta-se que a atribuição de notas deve seguir a técnica *Swing Weight*. As telas são organizadas por abas, onde a primeira remete às notas dos critérios e as demais referem-se a cada subcritério. Em todos os casos são apresentadas instruções de preenchimento das informações.

Figura 7: Tela para entrada das notas dos critérios

Avaliação Critérios

Notas dos Critérios

As notas dos critérios e subcritérios deverão ser de 0 a 100;
O critério mais relevante receberá a nota 100;
Em seguida, o segundo critério mais relevante deverá receber uma nota menor e assim por diante;
A diferença das notas indica o grau de importância de um critério em relação ao outro.

1 - Carregamento

2 - Queda de Tensão

3 - Qtde de clientes do alimentador

4 - Perdas no alimentador (kWh)

5 - Demanda reprimida AL com problema na dist (MVA)

6 - Extensão alimentador (km)

7 - Performance

Cancelar Avançar

Fonte: Elaborada pelo Autor (2017)

Após a atribuição das notas pelos especialistas, a ferramenta calcula os pesos de cada critério e subcritério consolidando as informações, conforme apresentado na Figura 8. Nesta tela também é possível visualizar e editar as notas atribuídas, bem como os critérios considerados e seus pesos.

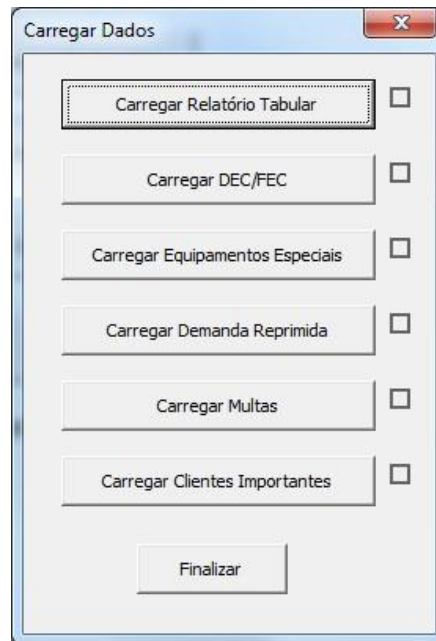
Figura 8: Tela para visualização e edição das notas dos critérios e subcritérios

		<input type="button" value="Nova Avaliação"/> <input type="button" value="Excluir Avaliação"/> <input type="button" value="Limpar Avaliações"/> <input type="button" value="Início"/>							
		Avaliação	1	2	3	4	5	6	7
		Avaliador	Gabriel	Roberto	Eduardo	Carlos Eduardc	João	Denis	Leandro
Critérios	Ranking	Peso Final	Nota	Nota	Nota	Nota	Nota	Nota	Nota
1 - Carregamento		0,192	85	80	85	30	70	85	100
2 - Queda de Tensão		0,233	100	100	100	90	70	100	90
3 - Qtde de clientes do alimentador		0,125	50	40	60	60	20	50	75
4 - Perdas no alimentador (kWh)		0,107	30	50	30	85	30	30	50
5 - Demanda reprimida AL com problema na dist (carr/queda) (MVA)		0,165	25	85	70	100	100	20	80
6 - Extensão alimentador (km)		0,075	20	30	50	40	5	48	20
7 - Performance		0,103	10	70	65	10	70	18	60
Subcritério Carregamento									
1.1 - Sobrecarga na troncal (%)		0,352	100	100	100	90	60	100	100
1.2 - Qtde de equipamentos especiais em sobrecarga (RT e TR) > 100%		0,225	30	80	50	70	60	60	75
1.3 - Qtde de clientes afetados por sobrecarga no alimentador (a jusante) >80%		0,217	60	60	60	60	100	50	25
1.4 - Extensão do trecho sobrecarregado da troncal (km)		0,206	50	30	40	100	90	40	50
Subcritério Queda de Tensão									
2.1 - Nível de tensão no pior trecho (pu)		0,206	100	100	50	60	100	100	80
2.2 - Qtde de clientes no trecho com nível de tensão precário		0,148	60	80	85	80	70	30	40
2.3 - Qtde de clientes no trecho com nível de tensão crítico		0,201	55	90	95	100	90	60	100
2.4 - Quantidade de equipamentos para regular a tensão (RT)		0,144	70	50	60	90	50	50	50
2.5 - Qtde de EPs no trecho com nível de tensão precário		0,128	58	60	90	50	70	40	20
2.6 - Qtde de EPs no trecho com nível de tensão crítico		0,174	53	70	100	70	90	70	60
Subcritério Qtde de clientes									
3.1 - Qtde de clientes total do alimentador		0,527	80	100	80	90	80	100	100
3.2 - Qtde de clientes importantes do alimentador		0,473	100	60	100	100	100	70	50
Subcritério Performance									
7.1 - FEC		0,311	100	100	100	80	90	100	80
7.2 - DEC (h)		0,256	95	20	95	90	70	90	100
7.3 - DM (duração média de interrupção DEC/FEC)		0,179	70	70	85	70	20	30	40
7.4 - Multas (R\$)		0,254	90	40	90	100	100	70	60
Pesos									
Critérios									
1 - Carregamento		0,265625	0,17582418	0,18478261	0,072289157	0,19178082	0,24216524	0,21052632	
2 - Queda de Tensão		0,3125	0,21978022	0,2173913	0,21686747	0,19178082	0,28490028	0,18947368	
3 - Qtde de clientes do alimentador		0,15625	0,08791209	0,13043478	0,144578313	0,05479452	0,14245014	0,15789474	
4 - Perdas no alimentador (kWh)		0,09375	0,10989011	0,06521739	0,204819277	0,08219178	0,08547009	0,10526316	

Fonte: Elaborada pelo Autor (2017)

Concluindo-se a etapa de definição de notas e critérios, necessita-se realizar a atualização dos dados para aplicação do MAUT. Esta ação é realizada clicando-se no botão “Carregar Dados” na página inicial, quando será aberto um menu (Figura 9), onde é possível escolher quais relatórios se deseja carregar. Confirmada esta ação, os dados serão carregados na ferramenta e utilizados na elaboração do ranking dos alimentadores.

Figura 9: Menu da ferramenta para carregar os dados dos alimentadores



Fonte: Elaborada pelo Autor (2017)

Finalizando com sucesso o carregamento dos dados, utiliza-se o botão “Criar *ranking*” no menu inicial para que a ferramenta aplique o método MAUT e hierarquize os alimentadores do sistema de média tensão, conforme exemplo na Figura 10.

Figura 10: Hierarquização de alimentadores do sistema de distribuição para fins de planejamento

Posição na Priorização	Alimentador	Tensão (pu)	Carregamento Troncal	Clientes	Extensão (km)	DEC	FEC	Multas (R\$)	Ranking
1	AL 50	0,0471	81,71	4012	92,34	0,073757639	0,01252	11662	0,38202
2	AL 356	0,3956	105,88	6288	18,25	0,3889952	0,06552	32324	0,37409
3	AL 65	0,2268	142,95	8991	130,85	0,000193235	0,00018	36509	0,35331
4	AL 10	0,3431	87,50	7975	28,66	0,021860001	0,00109	2575	0,35031
5	AL 248	0,5767	73,48	4364	12,67	0,063702016	0,00481	23753	0,34281
6	AL 53	0,6538	140,32	10340	101,31	0,027880229	0,00568	9079	0,33627
7	AL 257	0,3486	105,96	6293	18,26	0,082514023	0,01625	3366	0,33372
8	AL 25	0,0668	55,77	6175	16,30	1,144183889	0,06018	1921	0,33015
9	AL 185	0,2537	77,19	4584	13,30	0,077427782	0,00316	3177	0,32930
10	AL 238	0,6341	105,05	6239	18,11	0,092402308	0,01488	40424	0,32733
11	AL 245	0,6313	122,60	7281	21,13	0,014265302	0,01296	7042	0,32619
12	AL 44	0,0676	158,59	5426	223,70	0,282548282	0,05288	5244	0,32098
13	AL 354	0,9421	143,32	8512	24,70	0,274612866	0,07824	1	0,31668
14	AL 124	0,2191	2,87	63	43,28	0,053117277	0,00678	11272	0,31612
15	AL 12	0,8835	143,90	16034	1,08	0,002049744	0,01837	146534	0,31115
16	AL 309	0,0180	33,02	1961	5,69	0,092048624	0,02103	16643	0,30221
17	AL 178	0,3033	128,82	7651	22,20	9,98008E-07	0,06535	8496	0,28985
18	AL 47	0,8720	125,80	5120	150,59	0,278590762	0,0276	7992	0,28810
19	AL 232	0,2086	89,91	5340	15,50	0,01701446	1,6E-05	11824	0,28582
20	AL 251	0,2429	89,77	5332	15,47	0,079434714	0,00054	85723	0,28434
21	AL 201	0,3091	136,50	8107	23,53	0,00213915	0,00306	30048	0,28176
22	AL 283	0,3048	155,42	9231	26,79	0,21725468	0,1175	7153	0,27893
23	AL 91	0,2476	94,53	5429	51,78	0,079983865	0,12115	736	0,27851
24	AL 247	0,2936	108,40	6438	18,68	0,051472119	0,00714	21241	0,27535
25	AL 51	0,6270	128,13	5094	62,06	0,07856421	0,01409	32521	0,27282
26	AL 274	0,2836	125,64	7462	21,66	0,110986665	0,03669	19220	0,27259
27	AL 127	0,7499	141,78	8554	0,05	0,688097143	0,09552	10499	0,27207
28	AL 375	0,6442	150,58	8943	25,95	0,007660112	0,00347	1979	0,27125
29	AL 214	0,4478	89,28	5302	15,39	0,357156484	0,03798	244053	0,27066
30	AL 135	0,7140	102,20	16549	60,45	0,120642109	3,8E-05	3966	0,26992

Fonte: Elaborada pelo Autor (2017)

Com a hierarquização concluída, é possível exportar os dados para uma nova planilha no *Excel* ou imprimir o resultado de forma organizada e objetiva. A ferramenta também conta com uma seção de ajuda, que contém o detalhamento dos procedimentos utilizados, além de uma breve descrição do funcionamento do método MAUT.

3.5 Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

Neste trabalho foi apresentado o método MAUT como uma alternativa para as concessionárias de energia elétrica identificarem quais são os alimentadores mais críticos no seu sistema de distribuição, para fins de expansão do sistema. A aplicação do MAUT permite a realização de um planejamento robusto, apoiado em método multicriterial, sendo possível

alocar investimentos de forma mais eficaz, garantindo a qualidade no fornecimento de energia elétrica.

A avaliação e definição de critérios e subcritérios direcionados para o planejamento da expansão do sistema, realizada por profissionais especialistas envolvidos no ambiente da distribuidora de energia, foi de extrema importância no processo de determinação de prioridades e identificação dos alimentadores críticos. A aplicação do método MAUT no apoio à decisão possibilitou maior eficiência e confiança na definição dos alimentadores mais críticos e contribuiu significativamente para a transparência e consistência de todo o processo decisório.

A fundamentação teórica sólida e consistência apresentadas pelo método permitiram recomendações pautadas no julgamento das preferências dos especialistas, possibilitando discussões focadas nos critérios e nas atribuições dos pesos (ponderação dos critérios). Conforme ressaltado por Belton e Stewart (2002), os métodos de apoio multicritério visam complementar o julgamento intuitivo do decisor e sua experiência, mas não substituí-los.

A análise de sensibilidade constatou que o método MAUT aplicado na empresa distribuidora de energia é consistente, pois alterando o principal cenário não houve variação significativa no *ranking* dos alimentadores. Fica também evidente que, com o domínio do método, conforme as necessidades do sistema de distribuição da concessionária vão mudando, os critérios podem ser reavaliados de forma a representar melhor as características do sistema. Além disso, abre-se a possibilidade de utilizar o método para analisar outras áreas da empresa e outros componentes do sistema elétrico, tais como transformadores, linhas de transmissão e subestações.

A ferramenta desenvolvida trouxe maior sustentabilidade matemática na determinação de prioridades e tomada de decisão, e posteriormente no processo decisório das prioridades da expansão do sistema de distribuição, representando melhor as necessidades da distribuidora. Ela otimiza a depuração e apresenta a hierarquização de forma ágil e estratégica para definição de metas e a tomada de ações de curto, médio ou longo prazo no planejamento do sistema de distribuição.

Por fim, torna-se uma ferramenta muito importante e útil para os setores encarregados de analisar e realizar o planejamento da expansão da concessionária de energia elétrica, podendo ser também aplicada em diversas áreas da empresa e para diversas situações.

3.6 Referências

ANEELa. PRODIST Módulo 2 – Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição. **www.aneel.gov.br**, 12 de janeiro de 2016. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/prodist>>. Acesso em: Novembro 2016.

ANEELb. PRODIST Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. **www.aneel.gov.br**, 1º de janeiro de 2016. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/M%C3%B3dulo8_Revis%C3%A3o_7.pdf>. Acesso em: Novembro 2016.

BELTON, V.; STEWART, T. J. **Multiple Criteria Decision Analysis: an Integrated Approach**. Boston: Kluwer Academic Press, 2002.

BROWN, R. **Rational Choice and Judgment Decisor Analysis for the Decider**. Hoboken: Wiley, 2005.

CANDIAN, F. J. **Planejamento da Expansão de Sistemas Elétricos de Distribuição Considerando Fatores de Riscos em Análise Econômica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho. Ilha Solteira. 2008.

CLEMEN, R. T.; REILLY, T. **Making Hard Decisions With Decisions Tools**. Pacific Grove: Duxbury, 2001.

COSTA, T. C. D.; BELDERRAIN, M. C. N. **Decisão em Grupo em Métodos Multicritério de Apoio à Decisão**. Anais do 15º Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA XV ENCITA / 2009. São José dos Campos: [s.n.]. 2009.

ENSSLIN, L.; MONTIBELLER, G.; NORONHA, M. S. **Apoio à Decisão – Metodologias para Estruturação de Problemas Complexos e Avaliação de Alternativas**. 1. ed. Florianópolis, Insular, p. 296, 2001.

FERRET, R. **Hierarquização de Alimentadores para Fins de Manutenção utilizando Análise Multicriterial**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. 2012.

FRENCH, S.; BEDFORD, T.; ATHERTON, E. Supporting ALARP Decision Making by Cost Benefit Analysis and Multiattribute Utility Theory. **Journal of Risk Research**, v. 8(3), p. 207-223, 2005.

GABIATTI, A. **Desenvolvimento de um modelo de suporte multicriterial para gestão de programas de eficiência energética no segmento residencial das concessionárias de energia elétrica**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2004.

GOMES, L. F. A. M.; GOMES, C. F. S. **Tomada de Decisão Gerencial: Enfoque Multicritério**. 4ª. ed. São Paulo: Atals, 2012.

GONEN, T. **Electric Power Distribution System Engineering**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2008.

GUGLIELMETTI, F. R.; MARINS, F. A. S.; SALOMON, V. A. Comparação teórica entre métodos de auxílio à tomada de decisão por múltiplos critérios. **XXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, Ouro Preto - MG, 21 a 24 Outubro 2003.

HOSTMANN, M. et al. Multi-Attribute Value Theory as a Framework for Conflict Resolution in River Rehabilitation. **Journal of Multi-Criteria Decision Analysis**, v. 13 (2-3), p. 91-102, 2005.

ISHIZAKA, A.; NEMERY, P. **Multi-Criteria Decision Analysis: Methods and Software**. 1ª. ed. Chichester: Wiley, 2013.

KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B. D.; ROBBA, E. J. **Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. São Paulo: Blucher, 2010.

MARTINS, V. **Planejamento da Expansão de Sistemas de Distribuição Considerando Incertezas e Geração Distribuída**. UFRJ. Rio de Janeiro, p. 216. 2009.

MOREIRA, W. S. D. C. **Priorização de Obras em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando Algoritmo Genético Multiobjetivos**. UFSC. Florianópolis. 2009.

MUSTAJOKI, J.; HAMALAINEN, R. P. e LINDSTEDT, M. R. K. Using Intervals for Global Sensitivity and Worst-Case Analyses in Multiattribute Value Trees. **European Journal of Operational Research**, v. 174, n. 1, p. 278-292, 2006.

NEVES, B. C.; BARBOSA, B. D. F. **Análise de Risco em Empreendimento de Geração Elétrica: Uma Aplicação de Análise Multicritério**. Escola Politécnica, UFRJ. Rio de Janeiro. 2014.

PINTO, C. L. D. S. **Otimização em Dois Níveis Aplicada a Priorização de Obras do Sistema de Distribuição, Voltada ao Cumprimento dos Índices de Continuidade**. Escola polotécnica, USP. São Paulo. 2008.

ROY, B. Paradigms and Challenges. In: FIGUEIRA, J.; GRECO, S.; EHRGOTT, M. *et al.* **Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys**. Boston: Springer, 2005.

SCHÄFER, R. Rules for Using Multi-Attribute Utility Theory for Estimating a User's Interests. **9. GI-Workshop "Adaptivität und Benutzermodellierung in interaktiven Softwaresystemen"**, 2001.

SHIMIZU, T. **Decisão nas Organizações**. 2 ed. São Paulo: Atlas, 2006. 419 p.

SONCINI, P. **Modelagem multicriterial para análise de projetos de investimento – o caso de uma distribuidora de energia elétrica**. 2008. 152p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008

TCHEMRA, H. **Tabela de Decisão Adaptativa na Tomada de Decisão Multi-Critério**. Universidade de São Paulo. São Paulo. 2009.

TRAINOR, T. E.; PARNELL, G. S.; KWINN, J.; BRENCE, E.; TOLLEFSON, E.; DOWNES, P. **The US Army Uses Decision Analysis in Designing Its US Installation Regions**. *INFORMS*, 37(3), p. 253-264, 2007.

TRIANAPHYLLOU, E. **Multi-Criteria Decision Making Methods: A Comparative Study**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000.

TSAO, T.; CHANG, H. C. Composite reliability evaluation model for different types of distribution systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, v.18, n. 2, 2003, p. 924-930.

VARGAS, E. L. **Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição Através da Simulação de Alternativas e Análise Multicriterial**. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. 2015.

VIEIRA, G.; ALMEIDA, F. F. Teoria de Utilidade Multiatributo Aplicada ao Rastreamento de Medicamentos. *Revista de Ciência & Tecnologia*, Piracicaba, v. 34, p. 7-26, janeiro 2004.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

4.1 Conclusões

A melhora na acurácia da alocação de investimentos é tema de diversos estudos, sendo de interesse tanto para academia quanto para as empresas. O primeiro artigo, que teve como objetivo efetuar uma revisão bibliográfica sobre o estudo do processo decisório através de métodos multicritérios de apoio à decisão para utilização em priorização de investimentos em energia elétrica, mostrou a importância dos métodos multicritério no processo decisório de alocação dos investimentos, e como eles estão sendo aplicados no setor elétrico.

Os resultados da revisão bibliográfica mostraram: (i) que o AHP é o método mais popular para priorizar alternativas, seguido pelo PROMETHEE e ELECTRE (WANG et al., 2009); (ii) que o MAUT também é muito aplicado e é recomendado para problemas complexos, com diversos fatores quantitativos e qualitativos influenciando a decisão e com múltiplos objetivos conflitantes (LØKEN; BOTTERUD; HOLLEN, 2009); e (iii) que sistemas de apoio à decisão estão se tornando populares em planejamento energético e alocação de recursos (POHEKAR; RAMACHANDRAN, 2004).

O segundo artigo, cujo objetivo era demonstrar a aplicação da Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT) em um processo decisório de investimento para fins de planejamento da expansão do sistema de média tensão em uma concessionária distribuidora de energia elétrica, possibilitou maior eficiência e confiança na definição dos alimentadores mais críticos. A utilização da Teoria da Utilidade Multiatributo como método de apoio à decisão contribuiu significativamente para transparência e consistência de todo o processo decisório.

A fundamentação e a consistência apresentadas pelo método MAUT permitiu recomendações pautadas no julgamento das preferências dos especialistas, possibilitando discussões focadas nos critérios e nas atribuições dos pesos (ponderação dos critérios; BELTON; STEWART, 2002). O método de apoio multicritério complementou o julgamento intuitivo do decisor e sua experiência, mas como esperado, não o substituiu.

Na hierarquização dos alimentadores do sistema de média tensão para fins de planejamento da expansão do sistema elétrico ficou evidenciada a importância de um procedimento formal para auxiliar os decisores, proporcionando, desta forma, maior clareza, aprendizado e conhecimento de todo o processo.

O sistema de apoio à decisão consiste em um sistema de informações interativo, flexível e adaptável, especialmente desenvolvido para apoiar a solução de um problema gerencial não estruturado, para aperfeiçoar a tomada de decisão. Utiliza dados, provê uma

interface amigável e permite ao tomador de decisão ter sua própria percepção (TURBAN *et al.*, 2004). A ferramenta desenvolvida otimiza a depuração e apresenta a hierarquização de forma ágil e estratégica, tratadas e compiladas, para definição de metas e a tomada de ações de curto, médio ou longo prazo no planejamento do sistema de média tensão.

A sumarização de um grande número de informações pela ferramenta, facilitou, flexibilizou e agilizou a disponibilidade de conhecimento das prioridades no sistema de média tensão. Esta hierarquização é importante em um cenário onde se deve realizar mais com menos recursos, visando a expansão do sistema, melhoria dos indicadores de continuidade e consequentemente o incremento de receita, redução no risco do recebimento de multas do órgão regulador e pagamento de compensações financeiras aos consumidores devido à falta de energia ou baixa qualidade do sistema.

4.2 Sugestões para trabalhos futuros

A fim de dar continuidade ao estudo desenvolvido nesta dissertação, são propostos os seguintes trabalhos futuros:

- a) Análise da aplicação de outros métodos multicritério de apoio à decisão;
- b) Estudo da combinação de métodos multicritério de apoio à decisão;
- c) Combinar o trabalho de hierarquização dos alimentadores críticos com trabalhos desenvolvidos para seleção da melhor alternativa de solução para estes ativos;
- d) Ampliação da hierarquização de alimentadores considerando outros objetivos da concessionária de energia elétrica, como, por exemplo, manutenção dos ativos; e
- e) Aperfeiçoamento da ferramenta computacional desenvolvida através da inclusão de outros métodos e/ou avaliação de outros ativos elétricos.

4.3 Referências

LØKEN, E.; BOTTERUD, A.; HOLLEN, A. T. Use of the equivalent attribute technique in multi-criteria planning of local energy systems. **European Journal of Operational Research**, v. 197, n. 3, p. 1075-1083, 2009.

POHEKAR S. D.; RAMACHANDRAN, M. Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning – a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, p. 2263-2278, 2009.

TURBAN, E., MCLEAN, E., WETHERBE, J. **Tecnologia da informação para gestão. Transformando os negócios da economia digital.** 3ª edição. Porto Alegre. Editora Bookman, 2004.

WANG, J. J. *et al.* Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision making. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, p. 2263-2278, 2009.

APÊNDICE

APÊNDICE A - Formulário entregue aos especialistas para preenchimento das notas aos critérios

Orientações no preenchimento: As notas e subcritérios deverão ser de 0 a 100; O critério mais relevante receberá a nota 100; Em seguida, o segundo critério mais relevante deverá receber uma nota menor e assim por diante; A diferença das notas indica o grau de importância de um critério em relação ao outro.			
Nome do Especialista:			
Critérios	Ranking	Nota	Peso
1 - Carregamento			
2 - Queda de Tensão			
3 - Quantidade de clientes do alimentador			
4 - Perdas no alimentador			
5 - Demanda reprimida AL com problema na distribuição			
6 - Extensão alimentador			
7 - Performance			
Subcritérios 1 - Carregamento	Ranking	Nota	Peso
1.1 - Sobrecarga na troncal			
1.2 - Quantidade de equipamentos especiais em sobrecarga (RT e TR)			
1.3 - Quantidade de clientes afetados por sobrecarga no alimentador			
1.4 - Extensão do trecho sobrecarregado da troncal			
Subcritérios 2 - Queda de Tensão	Ranking	Nota	Peso
2.1 - Nível de tensão no pior trecho			
2.2 - Quantidade de clientes no trecho com nível de tensão precário			
2.3 - Quantidade de clientes no trecho com nível de tensão crítico			
2.4 - Quantidade de equipamentos para regular a tensão			
2.5 - Quantidade de EPs no trecho com nível de tensão precário			
2.6 - Quantidade de EPs no trecho com nível de tensão crítico			
Subcritérios 3 - Quantidade de clientes	Ranking	Nota	Peso
3.1 - Quantidade de clientes total do alimentador			
3.2 - Quantidade de clientes importantes do alimentador			
Critérios e Subcritérios 7 - Performance	Ranking	Nota	Peso
7.1 - FEC			
7.2 - DEC			
7.3 - DM (duração média de interrupção)			
7.3 - Multas			