Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Vinicius De Oliveira

AVALIAÇÃO DE MEDIDAS DE PREVENÇÃO E COMBATE A PERDAS NÃO TÉCNICAS NA DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

São Cristóvão
2022

VINICIUS DE OLIVEIRA

AVALIAÇÃO DE MEDIDAS DE PREVENÇÃO E COMBATE A PERDAS NÃO TÉCNICAS NA DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – PROEE, da Universidade Federal de Sergipe como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistema Elétrico de Potência.

Orientador: Professor Tarso Vilela Ferreira, D. Sc.

Aprovado pelo colegiado do PROEE em 14 /07/ 2022.

São Cristóvão
2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA-PROEE

TERMO DE APROVAÇÃO

"Avaliação de medidas de prevenção e combate a perdas não técnicas na distribuição de energia elétrica"

Discente:

Vinicius de Oliveira

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Sergipe, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada pela banca examinadora composta por:

Prof. Dr. Douglas Bressan Riffel (PROEE/UFS)
Presidente

Prof. Dr. Estácio Tavares Wanderley Neto (UNIFEI)
Examinador Externo

Profa. Dra. Ana Paula Henriques Gusmão de Araújo Lima (DEPRO/UFS)
Examinadora Externa

Vinicius de Oliveira
Candidato

Cidade Universitária "*Prof. José Aloísio de Campos",* 14 de julho de 2022.

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE

Oliveira, Vinicius de
O48e Avaliação de medidas de prevenção e combate a perdas não técnicas na distribuição de energia elétrica / Vinicius de Oliveira ; orientador Tarso Vilela Ferreira. - São Cristóvão, 2022.
106 f. : il.

Dissertação (mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Sergipe, 2022.

1. Engenharia elétrica. 2. Energia elétrica - Distribuição. 3. Energia elétrica - consumo. 4. Fraude. I. Ferreira, Tarso Vilela orient. II. Título.

CDU 621.3

A Davi, Miguel e Fabiana,

por serem razões da minha vida.

“Nascer sabendo é uma limitação porque obriga a apenas repetir e, nunca, a criar, inovar, refazer, modificar. Quanto mais se nasce pronto, mais refém do que já se sabe e, portanto, do passado; aprender sempre é o que mais impede que nos tornemos prisioneiros de situações que, por serem inéditas, não saberíamos enfrentar. ”

Mario Sergio Cortella.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por sempre conduzir minha vida.

A Fabiana, minha esposa, por sempre me apoiar em todos os momentos. Davi e Miguel, por me inspirarem e por darem um novo sentido às nossas vidas.

Aos meus pais, por tudo que sempre fizeram por mim, incentivando-me a novos desafios. Aos meus irmãos, fonte de minhas primeiras responsabilidades. Aos meus avós maternos, Nelson e Abgail Ferreira, que me auxiliaram na minha infância com seus conselhos. A meu avô paterno, Antônio Alves, que me ensinou o valor da paciência.

Agradeço aos meus orientadores, D. Sc. Tarso Vilela Ferreira e M. Sc. Duan Vilela Ferreira, pela confiança, incentivo, a forma como conduziram o trabalho e por me instigarem a fazer sempre o melhor.

Às empresas que participaram da pesquisa, obrigada por todas as informações passadas. Aos colaboradores da Vinaton Tecnologia, pelo apoio nos levantamentos em campo.

A todos os meus amigos do programa de pós-graduação em engenharia elétrica, que de maneira direta ou indireta me ajudaram com essa dissertação. Em especial ao PROEE, da Universidade Federal de Sergipe, que me concedeu a oportunidade de realização de um sonho.

A todos e a cada um,

Muito obrigado!

RESUMO

Esse trabalho tem por objetivo avaliar as medidas comumente aplicadas pelas concessionárias distribuidoras de energia na prevenção e combate a perdas não-técnicas, e assim contribuir com o desenvolvimento de estratégias de decisão para o enfrentamento deste problema. As perdas não-técnicas ou perdas comerciais, são perdas de energia elétrica causadas por fraudes e furtos nos circuitos de distribuição. As formas de fraude são as mais diversas possíveis e modificam-se constantemente, fazendo com que seja assunto prioritário em empresas e órgãos reguladores do setor elétrico. A metodologia empregada nesta pesquisa pretende ordenar as ações, de forma a começar pelas que geram os melhores resultados para redução das perdas não-técnicas. As intervenções analisadas foram: regularização de consumidores clandestinos, blindagem do padrão de medição, substituição de medidores, externalização da medição, suspensão do fornecimento de energia para unidades auto religadas e religação a partir de renegociação. Nesse contexto, o estudo realiza observações em 45 circuitos de distribuição que atendem mais de 5.000 consumidores, a fim de coletar informações sobre irregularidades no consumo de energia. Os diagnósticos de cada circuito contemplam três momentos distintos, o primeiro realizado antes da aplicação de ações para o combate a perdas não-técnicas (em média há 10 anos atrás), o segundo feito logo após as intervenções, e o último preparado em 2021. Com a análise das informações coletadas é possível descrever por meio de atributos a anatomia das perdas não-técnicas nestas áreas. Por fim, esta pesquisa apresenta o desenvolvimento e a aplicação de um modelo, baseado no método de apoio a decisão multicritério *Flexible and Interactive Tradeoff*, capaz de sustentar de forma axiomática as deliberações dos agentes do setor elétrico responsáveis pela definição das ações a serem priorizadas no enfrentamento das perdas não-técnicas.

Palavras-chave: apoio a decisão multicritério, distribuição de energia elétrica FITradeoff, perdas de energia, perdas não-técnicas.

ABSTRACT

This work aims to evaluate the measures commonly applied by energy distribution concessionaires in the prevention and fight against non-technical losses, and thus contribute to the development of decision strategies to face this problem. Non-technical losses or commercial losses are electrical energy losses caused by fraud and theft in distribution circuits. The forms of fraud are as diverse as possible and are constantly changing, making it a priority for companies and regulatory bodies in the electricity sector. The methodology used in this research intends to order the actions, starting with those that generate the best results for the reduction of non-technical losses. The interventions analyzed were: regularization of clandestine consumers, shielding the metering standard, replacement of meters, externalization of metering, suspension of energy supply to self-reconnected units and reconnection through renegotiation. In this context, the study makes observations in 45 distribution circuits that serve more than 5,000 consumers, in order to collect information on irregularities in energy consumption. The diagnoses of each circuit include three different moments, the first carried out before the implementation of actions to combat non-technical losses (on average 10 years ago), the second carried out shortly after the interventions, and the last prepared in 2021. With the analysis of the information collected, it is possible to describe the anatomy of the non-technical losses in these areas through attributes. Finally, this research presents the development and application of a model, based on the Flexible and Interactive Tradeoff multi-criteria decision support method, which is able to support the deliberations of the agents in the electricity sector responsible for defining the actions to be prioritized in the combat non-technical losses.

Keywords: multi-criteria decision support, FITradeoff, electricity distribution, energy losses, non-technical losses.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Procedimento para resolução de um problema de decisão. 30
Figura 2 - Comparação das consequências no método FITradeoff. 37
Figura 3 - Exemplo de diagrama de Hasse visualização de ordenação (FITradeoff). 41
Figura 4 - FITradeoff para problemática de ordenação. 42
Figura 5 - Etapas de desenvolvimento do modelo de avaliação. 58
Figura 6 - Rede de objetivos meio-fim. 61
Figura 7 – Fluxograma de aplicação do modelo. 67
Figura 8 - Avaliação holística do FITradeoff. 71
Figura 9 - Diagrama de Hasse após ordenação das constantes de escalas 72
Figura 10 - Elicitação Flexível do FITradeoff. 72
Figura 11 - Diagrama de Hasse após quarto ciclo. 74
Figura 12 - Diagrama de Hasse após o 11º ciclo. 75
Figura 13 - Diagrama de Hasse após o 24º ciclo. 78
Figura 14 - Análise de sensibilidade SAD FITradeoff. 79
Figura 15 - Resultado da análise de sensibilidade. 79
Gráfico 1 – Comparação entre os desempenhos dos critérios para as alternativas de regularização de clandestino e substituição de medidor. 76
Gráfico 2 – Intervalo das constantes de escalas dos critérios do 24º ciclo. 77
Quadro 1 – Métodos Multicritério. 32
Quadro 2 – Síntese bibliográfica. 53
Quadro 3 – Hierarquia de objetivos. 59
Quadro 4 – Hierarquia dos objetivos fundamentais. 63
Quadro 5 – Fonte de dados para o desempenho dos critérios. 70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo entre as regras práticas de interpretação para o coeficiente de correlação. 23
Tabela 2 – Matriz de consequências 70
Tabela 3 – Matriz de Avaliação. 73
Tabela 4 – Intervalo das constantes de escala na finalização do processo. 77
Tabela 5 – Porcentagem de vezes que as alternativas são estabelecidas na posição. 80
Tabela 6 –Comparação entre os modelos de avaliação. 82

LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica, p.9
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica, p.17
CM	Custo Médio, p.59
EA	Energia Agregada, p.59
EPE	Empresa de Pesquisas Energéticas, p.48
GP	Grau de Proteção da Atividade, p.59
GPRS	*General Packet Radio Service*, p.43
GR	Grau de Risco da Atividade, p.59
MAVT	*Multi-Attribute Value Theory*, p. 30
MCDA/M	Método Multicritério de Apoio a Decisão, p.10
MD	Mineração de Dados, p.41
MO	Medidas Operacionais, p.41
NP	Número de Padronizações, p.59
PNT	Perdas Não Técnicas, p.9
PPL	Problema de Programação Linear, p.33
PRODIST	Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, p. 16
PROEE	Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, p.ii
PRORET	Procedimento de Regulação Tarifária, p.18
PT	Perdas Técnicas, p.9
SAD	Sistema de Apoio à Decisão, p.14
SDAT	Sistema de Distribuição de Alta Tensão, p.16
SDBT	Sistema de Distribuição de Baixa Tensão, p.16
SDMT	Sistema de Distribuição de Média Tensão, p.16
SEP	Sistema Elétrico de Potência, p. 9
TM	Tempo Médio de Serviço, p.59
UC	Unidade Consumidora, p.70
UFS	Universidade Federal de Sergipe, p. ii
VFT	*Value Focused Thinking*, p. 14

LISTA DE SÍMBOLOS

P_G	Perdas Globais de Energia na Distribuição
$\boldsymbol{E_E}$	Energia Gerada Entregue
$\boldsymbol{E_C}$	Energia Comercializada
P_{PT}	Perdas Técnicas no Segmento de Distribuição
P_{PNT}	Perdas Não-Técnicas no Segmento de Distribuição
N	Distribuição Normal
$P.\alpha$	Problemática da Escolha
$P.\beta$	Problemática de Classificação
$P.\gamma$	Problemática de Ordenação
$P.\delta$	Problemática de Descrição
I	Indiferença
P	Preferência Estrita
Q	Preferência Fraca
R	Incomparabilidade
$v(a_j)$	Função Valor Global
a_j	Alternativa j
k_i	Constante de Escala do Critério i
I	Critério
φ_n	Espaço de Pesos

SUMÁRIO

1 Introdução 9
1.1 Justificativa 11
1.2 Objetivos 13
1.3 Metodologia da Pesquisa 14
1.4 Estrutura da Dissertação 14
2 Fundamentação Teórica 16
2.1 Perdas Globais de Energia Elétrica 16
2.1.1 Perdas Técnicas (PT) 17
2.1.2 Perdas Não-Técnicas (PNT) 18
2.1.3 Prevenção e Combate a Perdas 20
2.1.4 Caracterização das Perdas 22
2.2 *Value Focused Thinking* (VFT) 24
2.3 Métodos Multicritério 26
2.3.1 Métodos de Agregação Aditivos 32
2.3.2 FITradeoff 35
2.3.3 FITradeoff aplicado à Problemática de Ordenação 40
3 Revisão Bibliográfica 44
3.1 Mecanismos Operacionais 44
3.2 Mineração de Dados 47
3.3 Métodos Multicritério 50
3.4 Síntese Bibliográfica 52
4 Proposição do Modelo 55
4.1 Justificativa do Método 56
4.2 O Modelo Proposto 57
4.2.1 Definição de Objetivos 58
4.2.2 Estabelecimento dos Critérios de Avaliação 62
4.2.3 Definição das Escalas de Avaliação 63
5 Aplicação do Modelo e Resultados 66
5.1 Identificação do Decisor 67
5.2 Medidas Avaliadas 67
5.3 Aplicação do Modelo de Avaliação 69
5.3.1 Análise de Sensibilidade 78
5.4 Discussão dos Resultados 81
6 Conclusão 85
6.1 Considerações Finais 85
6.2 Trabalhos Futuros 87
Referências 89
Apêndice A – Questionário para Elicitação de Objetivos 95
Anexo 1 – Anatomia das Perdas 98

1 INTRODUÇÃO

A perda de energia elétrica está presente em todo o sistema elétrico de potência (SEP), desde a geração até a distribuição. As perdas são caracterizadas pela energia produzida, mas que não é comercializada, e são classificadas em Perda Técnicas (PT) e Perdas Não Técnicas (PNT) [1]. O conhecimento do nível de perdas de energia e suas características são cruciais para avaliar a condição de operação da rede, a eficiência no fornecimento de energia, e a eficácia das ações voltadas à redução de perdas.

A maioria das empresas distribuidoras de energia em países em desenvolvimento apresentam elevadas taxas de perdas de energia devido a parcela de PNT. Nestas companhias as PNT podem representar 40% da capacidade total de geração. Este percentual é influenciado pela infraestrutura deficiente, que prejudica a detecção e o controle das potenciais causas de PNT. As perdas afetam a qualidade do fornecimento e a tarifa de eletricidade paga por clientes regulares [2]. Especificamente, altas taxas de PNT foram relatadas na maioria dos países em desenvolvimento do Sudeste Asiático, que inclui Malásia, Indonésia, Tailândia, Mianmar e Vietnã [3]. À luz deste problema, outros países em desenvolvimento, como Bangladesh, Índia, Paquistão e Líbano, apresentam taxa de perdas com média entre 20% a 30% [4, 5].

O problema das PNT não é só enfrentado pelos países menos desenvolvidos de regiões da Ásia e da África, mas também por países desenvolvidos, como os Estados Unidos da América e Reino Unido [3]. Na Polônia os índices de perdas totais que variam de 6% até 12% do total da energia injetada, resultantes da variação de PNT, e diretamente influenciadas pelos investimentos em infraestrutura de rede elétrica [6].

No Brasil em 2020, as PNT representaram 7,3% do total da energia injetada no sistema, o que equivale a 37,9 TWh [7]. Com o objetivo de manter controlado o nível de PNT, a Agência Nacional de Energia Elétrica[1] (ANEEL) estabelece valores regulatórios como indicadores para as perdas na distribuição. Este índice é obtido por meio de critérios

[1] Agência reguladora e fiscalizadora, responsável por garantir a geração, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica, em conformidade com as políticas e diretrizes do Governo Federal [8].

de eficiência de cada concessionária, e refletem no custo da perda repassada aos consumidores [8]. No entanto, as distribuidoras que não atendem o valor regulatório limite sobre essas perdas são penalizadas com redução do repasse tarifário. Para evitar as penalidades, melhorar o lucro e garantir a qualidade no fornecimento de energia, as empresas distribuidoras de energia elétrica devem promover medidas para redução das PNT.

Diante do exposto, a identificação das causas de PNT nos circuitos de distribuição de energia elétrica desperta o interesse, tanto da academia como das companhias. O valor da tarifa de energia, o índice de analfabetismo e a taxa de desemprego, são fatores que influenciam o consumo ilegal de energia [2].

Dentre as ações adotadas pelas concessionárias, a instalação de medidores inteligentes com leitura automatizada é considerada uma técnica avançada para monitoramento e controle de perdas, ao permitir o acompanhamento instantâneo do consumo e da carga de cada unidade consumidora [9]. Contudo, a solução de medidores inteligentes não é financeiramente viável para as distribuidoras de energia de países em desenvolvimento, o que as leva a adotar diferentes alternativas a fim de reduzir PNT [10]. Nestes países, as medidas usualmente aplicadas são: instalação de medição fiscalizadora para balanço energético, regularização de unidades consumidoras clandestinas, substituição de medidores danificados, blindagem de redes de distribuição, externalização do padrão de medição e suspensão do fornecimento de energia para unidades auto religadas [11, 12, 13].

Os custos operacionais das medidas citadas anteriormente ainda são elevados, o que tem fomentado o desenvolvimento continuo de técnicas para reconhecimento de perdas. Na literatura, são frequentes trabalhos que propõem desenvolvimento de modelos computacionais para detecção de consumidores fraudulentos [14, 15, 16]. Todavia, esta pesquisa constata a carência de estudos baseados em dados reais, sem vícios ou filtros, capazes de identificar características comuns aos circuitos de distribuição com altos índices de perdas. Ainda mais escassas são as discussões sobre métodos de suporte à decisão capazes de auxiliar a avaliação das intervenções, e indicar, por exemplo, quais devem ser aplicadas em um determinado cenário.

Neste contexto, pode-se entender que a avaliação das ações de reduções de PNT é relevante e complexa para as organizações, dado que a aplicação das intervenções requer alto investimento financeiro, disponibilidade de mão de obra qualificada e considerável tempo de implementação. Desta forma, é recomendável para solução,

avaliar o problema sob a perspectiva de múltiplos critérios com o suporte de métodos multicritério de apoio a decisão (MCDA/M). A aplicação destes métodos tem o propósito de auxiliar na sistematização das informações e definições das preferências com relação aos atributos das alternativas avaliadas, apresentando uma solução para o problema de decisão [17].

Sendo assim, neste trabalho propõe-se o desenvolvimento de um modelo de decisão baseado em método multicritério, com o propósito de contribuir com a gestão das companhias na avaliação das medidas de prevenção e combate a PNT. Como forma de demonstração da aplicabilidade e utilidade do modelo, foi realizado um estudo de caso, analisando informações de circuitos de distribuição de uma concessionária distribuidora de energia brasileira. Na próxima seção serão apresentadas as justificativas para esta pesquisa.

1.1 JUSTIFICATIVA

A crescente dependência da eletricidade resultante da evolução das tecnologias que servem a sociedade, promove um crescimento contínuo do consumo energia, intensificando as discussões sobre o uso eficiente deste recurso. Neste cenário, as perdas de energia apresentam-se como um problema a ser amplamente superado.

Em todo o mundo estima-se que as perdas custem às empresas distribuidoras aproximadamente US$ 96 bilhões por ano [18]. No Brasil, apenas em 2021, as PNT representaram um custo de 8,6 bilhões de reais (aproximadamente 1,7 bilhões de dólares), considerando o preço médio da energia dos processos tarifários [7].

Do montante dos custos apresentado para PNT no Brasil no ano 2020, exclusivamente R$ 5,6 bilhões são consideradas PNT regulatórias, calculadas conforme metodologia da ANEEL. A diferença entre os valores representa prejuízos às concessionárias, já os custos das PNT regulatórias correspondem a aproximadamente 2,9% do valor da tarifa paga pelo consumidor [7].

No comparativo entre o ano de 2010 a 2020 as perdas de energia no Brasil tiveram um incremento de 1%, chegando a 14,8% de toda energia injetada no SEP. No mesmo período as PNT cresceram 0,7%, totalizando 7,3% [7]. Também neste intervalo, houve um crescimento de 16% no consumo de energia, refletindo sobre os valores absolutos de PNT [19].

No ano de 2021, uma combinação de falta de planejamento, erros políticos, falhas técnicas e condições climáticas extremamente desfavoráveis precipitaram uma crise energética no Brasil [20], contribuindo com as discussões sobre perdas.

Retratado o impacto técnico e econômico das PNT, pode-se perceber que os processos decisórios envolvendo as ações a serem empregadas na mitigação do problema são relevantes para a gestão destas organizações, principalmente no planejamento destas medidas e dos recursos por elas demandados [21]. Além do mais, o mesmo método e meio aplicado podem produzir resultados diferentes para cada cenário analisado [6].

Desse modo, a priorização das atividades de uma organização em função da criticidade deve considerar diversos fatores, a depender do problema. Exemplos típicos de fatores são: o custo da atividade, a variabilidade da duração, a influência do clima, mobilização de recursos, necessidade de pessoal qualificado, segurança, dentre outros [22]. Atualmente, as empresas distribuidoras de energia consideram apenas os critérios energia agregada e número de unidades consumidoras irregulares desassociados, para avaliação das medidas de combate as PNT, restringindo a análise do problema.

Ao ponderar a ascendente complexidade das decisões, observando o crescente número de parâmetros gerados pela informatização dos processos, associado à restrição do tempo disponível aos gestores para estruturação deste tipo de problema, percebe-se a necessidade de desenvolvimento de uma ferramenta adequada ao atendimento desta questão.

No contexto específico das PNT, fica evidenciado em [23], que em regiões com elevadas taxas de perdas não há um tipo de irregularidade prevalecente, geradora exclusiva do problema. Com a necessidade de associar medidas, superar limitações operacionais, otimizar a aplicação de recursos financeiros, e acelerar resultados, manifesta a importância de avaliação das medidas.

Neste sentido, a abordagem multicritério oferece uma alternativa consistente para a tomada de decisão [24]. Os modelos de processos decisórios de problemas multicritérios são mecanismo que tem por finalidade apresentar uma solução para o problema, de acordo com as preferências dos decisores.

Diante das informações expostas, torna-se evidente a necessidade de desenvolver um modelo apropriado para avaliar e indicar as ações que devem ser empregadas na redução das PNT, com propósito de maximizar resultados e reduzir custos, mantendo-se flexível para atender os diferentes cenários a serem analisados. Nesta perspectiva, busca-

se o desenvolvimento de um modelo de decisão robusto, apto a analisar cada alternativa frente a múltiplos objetivos, conflitantes entre si.

Assim, esta pesquisa pretende consolidar, através da aplicação, um modelo baseado no método axiomático, o FITradeoff com foco na problemática da ordenação, capaz de subsidiar as decisões dos agentes do setor elétrico no sentido de priorizar as ações que promovem os melhores resultados.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal do presente trabalho é desenvolver e aplicar um modelo de apoio a decisão baseado numa abordagem multicritério que possa suportar o processo de avaliação das ações de redução de PNT aplicadas pelas concessionárias distribuidoras de energia, de maneira que este permita auxiliar no direcionamento de estratégias de combate às perdas.

Como forma de atingir o objetivo primário deste trabalho, também foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Reconhecer os tipos de intervenções utilizadas na prevenção e combate a PNT e suas formas de aplicação a partir da revisão da literatura;
- Identificar tecnologias e métodos multicritério utilizados como ferramentas de decisão, disposto na literatura;
- Caracterizar a anatomia das perdas dentro do cenário estudado, através da análise da base de dados construída a partir da observação de três circunstâncias: antes da aplicação das medidas de combate ao PNT, após as interferências, e a que reflete o estado atual;
- Estruturar os parâmetros do modelo, através da interação com os envolvidos no processo de desenvolvimento;
- Propor um modelo capaz avaliar o desempenho das ações e colocar em ordenação as intervenções a serem priorizadas na prevenção e combate a PNT;
- Validar o modelo através da aplicação em um estudo de caso, a partir das informações colhidas durante o processo de caracterização das PNT em

regiões com elevada taxa de perdas, em uma empresa distribuidora de energia;

- Avaliar os resultados obtidos através de análise de sensibilidade aplicada ao modelo.

1.3 METODOLOGIA DA PESQUISA

No desenvolvimento desta pesquisa, cujo objetivo está relacionado com o desenvolvimento de um modelo para avaliação das medidas aplicadas na prevenção e combate a PNT, em que as ações serão ordenadas em uma sequência de priorização através de uma abordagem multicritério, foi adotada uma metodologia que se divide em 4 fases.

Na primeira fase, foi realizada uma revisão da literatura com objetivo de adquirir conhecimento sobre as medidas empregadas para redução das PNT, e métodos multicritério de apoio a decisão.

Na segunda fase, foi efetivado um diagnóstico sobre a situação real das PNT em 45 circuitos de distribuição de energia, que atendem cerca de 5.000 consumidores, com a finalidade de contextualizar o problema de decisão, assegurando a aplicação factual do modelo a ser proposto. As avaliações alcançaram uma boa diversidade de circuitos, dentro de uma região com alto índice de perdas.

Na terceira fase, foi realizada a estruturação do modelo de decisão, baseado no processo estabelecido em [25], compreendendo três fases: preliminar, modelagem de preferência e escolha do método, e finalização. Neste ponto, foi utilizada a técnica *Value Focused Thinking* (VFT) para identificação dos objetivos do problema.

Na última fase, foi executada a aplicação do modelo proposto, com suporte do sistema de apoio à decisão (SAD) do método FITradeoff para problemática de ordenação, seguida por uma análise de sensibilidade e, por fim, foram discutidos os resultados.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada em seis capítulos. O primeiro apresenta uma introdução ao tema discutido ao longo do trabalho, além da justificativa, objetivos e metodologia utilizada. No segundo capítulo, é apresentada uma Fundamentação Teórica,

discutindo os conceitos explorados nesta pesquisa. No terceiro capítulo, é apresentada uma ampla Revisão Bibliográfica, abrangendo mecanismo operacionais, técnicas de detecção e métodos de apoio a decisão relacionados ao assunto. No quarto capítulo, são apresentados o modelo de decisão proposto e os seus parâmetros. No quinto capítulo, é apresentada a aplicação do modelo e os resultados. Por fim, no sexto e último capítulo, estão presentes as considerações finais trabalho, bem como as limitações e propostas para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem como objetivo auxiliar a compreensão acerca de perdas de energia elétrica na distribuição. Os pontos em destaque sobre este assunto são: definições, tipos de perdas, características, cálculos, e medidas de prevenção e combate. Também são apresentados os métodos multicritério, ferramenta que contribui para a eficácia na deliberação de ações, neste caso aplicadas a mitigação de perdas elétricas. Neste contexto são apresentados: a técnica de estruturação de problema baseada em valor *Value-Focused Thinking* (VFT), e o método de decisão multicritério flexível e interativo (FITradeoff) para problemática de ordenação, aplicado à racionalidade compensatória.

2.1 PERDAS GLOBAIS DE ENERGIA ELÉTRICA

O sistema elétrico de potência (SEP) pode ser dividido em três partes: geração, transmissão e distribuição. As Perdas Globais de energia podem ser definidas como energia elétrica gerada que percorre as linhas de transmissão, e redes de distribuição, mas que não é comercializada, seja por motivos técnicos e/ou comerciais [7, 15, 26, 27]. As perdas técnicas são inerentes ao processo de transporte de energia, e consistem principalmente na dissipação de energia em diversos elementos do SEP. As perdas comerciais, também conhecida como perdas não-técnicas, são provocadas essencialmente pela falta de faturamento de parte da energia distribuída [28]. Na Equação 1 é apresentada a definição matemática de perdas globais.

$$\boldsymbol{P_G} = \boldsymbol{E_E} - \boldsymbol{E_C}. \tag{1}$$

Em que

$\boldsymbol{P_G}$ refere-se às perdas globais de energia na distribuição;

$\boldsymbol{E_E}$ refere-se a toda energia gerada, e;

$\boldsymbol{E_C}$ define toda energia comercializada.

2.1.1 PERDAS TÉCNICAS (PT)

As perdas técnicas (PT) ocorrem durante a transmissão e distribuição, nas subestações, nos transformadores e nas linhas, causadas pelas propriedades físicas dos próprios componentes elétricos [28]. Neste contexto estão incluídas as perdas resistivas em alimentadores primários, transformadores de distribuição, rede secundária, ramal de serviço e medidores de energia [29].

Consequentemente, as PT relacionadas ao processo de transformação e transporte de energia são inevitáveis [1]. Todavia, elas podem ser reduzidas com o desenvolvimento de novas tecnologias, e com as manutenções preditiva, preventiva e corretiva.

As PT podem ser explicitadas como perdas de energia ou demanda. As perdas de energia são calculadas para período de tempo definido e expressa em quilowatt-hora (kWh) ou megawatt-hora (MWh), já as perdas por demanda são calculadas instantaneamente através de uma determinada curva de carga, e medidas em quilowatt ou megawatt [28].

Existem diferentes métodos para levantar as perdas técnicas de energia. Dependendo das informações disponíveis do SEP, podem-se calcular essas perdas por meio de estudos de fluxos de energia, métodos estatísticos, dentre outros [15, 30, 31]. Uma típica metodologia para estimar PT é baseada em modelagem, para a qual é efetuada a apuração de perdas em cada segmento do sistema: rede de alta tensão, sub transmissão, transformação da alta para média tensão em subestações, rede primária em média tensão, transformador de distribuição, rede secundária, ramal e medidor [32, 33, 34].

O cálculo das PT é realizado considerando o ativo de perdas de energia em condições de pico de carga (por meio de modelos computacionais e dados de carga registrados), seguido pela aplicação de um fator de perda, que estima as perdas médias de energia e, por fim, multiplicando a média de perdas pelo tempo em horas, para obtenção do acumulado de perdas de energia mensal ou anual [11].

As perdas de energia nas redes e nos equipamentos associados ao Sistema de Distribuição de Alta Tensão (SDAT) são apuradas por dados obtidos do sistema de medição na fronteira dos subsistemas, já as perdas relacionadas ao Sistema de Distribuição de Média e Baixa Tensão (SDMT e SDBT, respectivamente) são obtidas

pela aplicação do método de fluxo de potência [8]. Para os medidores localizados nas unidades consumidoras do grupo B (baixa tensão) são computadas as perdas nas bobinas de tensão.

Na distribuição, fica a cargo da concessionária distribuidora determinar as PT por segmento, aplicando o método de fluxo de potência, descrito no Módulo 7 do Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST). À ANEEL cabe inspecionar a maneira como os valores são obtidos, de acordo com as características da rede elétrica de cada concessionária, estabelecendo as PT regulatórias adotadas como referencial em cada distribuidora [8].

Na transmissão, as perdas de natureza técnica são apresentadas mensalmente pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) [1].

Além das perdas nos segmentos observados, existem outras perdas causadas por: conexões, banco de capacitores, reguladores de tensão, efeito corona e fuga nos isolamentos de linhas de transmissão e distribuição. Estas perdas são normalmente estimadas, em particular pela dificuldade de calculá-las, no percentual entre 5% a 10% das PT calculadas para os demais segmentos [35].

2.1.2 PERDAS NÃO-TÉCNICAS (PNT)

As perdas não-técnicas (PNT), também chamada de perdas comerciais, são causadas pelo não faturamento da energia distribuída. Em Madrigal *et al.*[15], são apresentados os tipos de PNT:

a) furto de energia, praticados por não clientes da empresa;
b) fraude no fornecimento, realizadas por clientes da empresa;
c) falhas ou imprecisões de medição;
d) erros de leitura ou diferenças no faturamento.

Perdas por furto de energia e fraude são causadas por terceiros, enquanto que erros de faturamento são gerados pelo processo administrativo da concessionária [15].

O roubo de energia é caracterizado por conexões clandestinas, desvios direto da rede, sem qualquer forma de cobrança, enquanto a fraude de energia ocorre devido à adulteração do equipamento de medição, o que provoca erro de leitura, e consequentemente divergências no faturamento da energia [36]. No contexto mais amplo,

a fraude é definida como uso desonesto ou ilegal de equipamento ou serviço de eletricidade, com a intenção de evitar o faturamento correto [4].

As falhas na medição podem ser geradas pela manipulação dos equipamentos de modo que eles não registrem o consumo real [27], ou também pela deterioração dos instrumentos internos de medida que causam o registro incompleto da energia consumida [13].

Existem diferentes formas de adulterar o medidor. Dentre a contrafação mais identificada, estão o emprego de ímãs de neodímio em medidores eletromagnéticos, e o uso de dispositivos de radiofrequência aplicados nos equipamentos de medição eletrônicos. Outros métodos de adulteração do medidor incluem a troca dos terminais de entrada e saída, avaria da bobina de pressão, injeção de harmônicos indesejáveis, e exposição a choques mecânicos [2].

Os erros de faturamento também podem ser causados pela ineficiência do sistema comercial das concessionárias [36]. Este tipo de falha ocorre durante o processo de coleta da leitura, ou durante o processamento da faturação[4].

Devido à natureza das PNT, é improvável encontrá-las em sistemas de geração e transmissão, ou seja, sua presença pode ser considerada exclusiva para sistemas de distribuição, uma vez que estão mais expostos a ações ilegais [37].

Enquanto as perdas técnicas são calculadas por técnicas de modelagem, as perdas não-técnicas são determinadas pela diferença entre as perdas globais na distribuição e as perdas técnicas [9, 11, 38, 39]. Na Equação 2 é apresentada a definição matemática para PNT.

$$\boldsymbol{P_{PNT} = P_G - P_{PT}}. \tag{2}$$

Em que:

$\boldsymbol{P_G}$ refere-se a perdas globais de energia na distribuição;

$\boldsymbol{P_{PT}}$ refere-se a perda técnica no segmento distribuição;

$\boldsymbol{P_{PNT}}$ define as perdas não-técnicas.

As PNT provocadas por consumidores ilegais conectados à rede de distribuição afetam a qualidade da energia fornecida, provocam sobrecarga, e inferem na tarifa de eletricidade dos consumidores regulares [2]. Além disso, as ligações clandestinas de

eletricidade podem provocar choques elétricos e incêndios, o que compromete a segurança dos serviços de eletricidade, dos indivíduos e de suas propriedades.

O impacto das PNT na tarifa de energia elétrica repassada ao consumidor é dimensionado por meio de valores regulatórios obtidos a partir de critérios de eficiência de cada concessionária [1]. Todavia as distribuidoras que não atendem ao limite regulatório para PNT são penalizadas com redução do repasse tarifário. Para evitar penalizações, otimizar receitas e melhorar as condições de fornecimento de energia, as concessionárias devem promover ações eficientes para a prevenção e combate de PNT [8].

Conforme o Procedimento de Regulação Tarifária – PRORET [40], as concessionárias de distribuição são obrigadas a enviar relatórios anuais para ANEEL, apresentando os resultados das ações promovidas, e o plano de redução de perdas. O plano apresentado tem como objetivo atender as metas impostas para redução de PNT pelas revisões tarifárias, que ocorrem em intervalos de 4 a 5 anos.

2.1.3 Prevenção e Combate a Perdas

As medidas para reduzir as perdas podem variar entre as diferentes distribuidoras de energia, contudo em sua grande maioria elas priorizam projetos que consideram implicitamente a economia, e visam explicitamente a redução de perdas do sistema [41].

A prevenção de perdas está relacionada com a aplicação de medidas para evitar roubos e fraude no sistema de distribuição de energia. Conforme [28], são medidas práticas de prevenção: técnicas de blindagem de circuitos, rede inteligente, e programas socioeducativos.

Na blindagem as conexões de energia são realizadas em um caixa blindada, no topo da estrutura, com o objetivo de prevenir roubo de eletricidade [13]. A blindagem de unidade consumidora consiste na substituição do padrão de medição da unidade consumidora, incluindo instalação de caixa de medição blindada em aço, parafuso de segurança para fechamento da caixa e ramal de entrada em cabo concêntrico conectado diretamente a medição (antes da proteção).

Com a implementação de rede inteligente é possível automatizar o processo de leitura, um recurso importantíssimo para a prevenção de perdas comerciais. Na leitura automatizada a medição é feita em um instante contínuo de tempo [10]. Os medidores inteligentes também viabilizam a operação com energia pré-paga, além de

proporcionarem a implementação de ações remotas, como: leitura, corte, detecção de violação, notificação de interrupção e análise de carga [9].

Entre os programas socioeducativos, destacam-se as políticas sociais para custeio da energia. Os subsídios a clientes pobres em forma de tarifa social, tornam o preço da eletricidade mais acessível, e incentiva o uso regular [2].

Do mesmo modo, a criminalização do furto e da fraude de energia também é considerada uma política social para prevenção a perdas comerciais. No Brasil, furto ou fraude energética é punido por lei, como um crime previsto no Código Penal. Fraude é caracterizada no Artigo 171, e a pena para este crime é reclusão de 1 a 4 anos [42]. O furto, por outro lado, se enquadra no Artigo 155, e tem pena de 2 a 8 anos de prisão [42]. Além disso, quando os crimes são descobertos, os valores retroativos de consumo e uso da rede são cobrados como multa, e o consumidor fraudulento ou ilegal pode ser sujeito à suspensão do fornecimento de energia. A redução no roubo de energia melhora a geração de receita e promove avanços na qualidade da energia fornecida pelas concessionárias [38] .

No combate às PNT estão compreendidas ações de detecção a fraude e consumo irregular como: monitoramento por telemetria, inspeção física e métodos de gestão [43]. Associada à identificação das irregularidades está a execução de medidas práticas, tais como: externalização do padrão de medição, regularização de consumidores clandestinos, substituição de medidores, religação de unidades consumidoras, suspensão do fornecimento de energia, entre outras.

Cada vez mais, a análise de informações coletadas por medição remota em tempo real, estão sendo utilizadas para identificar roubo de energia e irregularidades em leituras do medidor [18]. Os dados coletados remotamente são eficientes para detecção de fraude [11]. O uso de conhecimento adquirido sobre os perfis de carga de cliente é imprescindível na detecção de desvios comportamentais significativos, devido às atividades de PNT de energia [44]. Tradicionalmente, a análise de perfil de carga e a comparação com a carga medida é uma técnica muito utilizada na detecção de perdas [9].

Outro método bastante utilizado na localização, detecção e controle de perdas de energia na distribuição é a realização de balanços de energéticos. Estes balanços consistem em comparar a energia total consumida (medida e faturada) pelos clientes, com a energia total gerada ou entregue a subestações de distribuição [11]. A diferença entre a energia medida no alimentador e a energia faturada pela concessionária acrescida às PT, aponta o volume de PNT. Em países onde os recursos são escassos, e a tecnologia de rede

inteligente está longe da realidade, a instalação de medidores ao longo de alimentadores para balanço de energia permite estimar com precisão as PNT [30].

Aplicada no combate a PNT, a externalização do padrão da medição corresponde a transferência da caixa de medição localizado na área interna da unidade consumidora para um local externo, com acesso por via pública, e tem como objetivo mitigar os impedimentos de leitura [45].

Igualmente, a regularização das unidades clandestinas ligados diretamente à rede de distribuição secundária, sem o conhecimento da concessionária, são indispensáveis no combate a perdas [28]. O processo de regularização compreende adequação do padrão de medição, e aplicação do contrato de fornecimento de energia.

Outras medidas, como a substituição de medidores eletromecânicos antigos por equipamentos de medição eletrônicos de energia com recursos contra violação, coíbem as perdas geradas pela adulteração do medidor [38].

Complementarmente, as campanhas para renegociações de dívida, evitam a suspensão de fornecimento de energia, além de propiciar a religação de unidades a partir do parcelamento das pendências financeiras, evitando o acesso irregular a rede de energia.

2.1.4 Caracterização das Perdas

O conhecimento sobre as características das perdas nos circuitos de distribuição de energia elétrica é indispensável para a definição das intervenções a serem realizadas na solução do problema.

A análise das relações entre diferentes variáveis associadas as características dos circuitos de distribuição elétrica são imprescindíveis na representação da anatomia das perdas. Além das representações gráficas, frequentemente os estudos utilizam os de testes de correlação de Pearson para avaliar estas conexões.

O coeficiente de correlação de Person, é uma medida de associação entre variáveis muito utilizada em diferentes áreas da pesquisa científica [46]. A correlação refere-se à relação linear entre variáveis, de modo que o coeficiente de correlação é uma medida da associação entre duas variáveis numéricas [47]. Uma correlação que mede a direção e a força da relação linear entre duas variáveis quantitativas [48].

O coeficiente de correlação de Pearson varia entre -1 e 1. O sinal indica a direção da correlação (negativa ou positiva) enquanto que o valor indica a magnitude. Quanto mais perto de 1 mais forte é o nível de associação linear entre as variáveis [49]. Na Tabela

1, são comparadas interpretações do coeficiente de correlação apresentadas em [50, 51, 52].

Tabela 1 – Comparativo entre as regras práticas de interpretação para o coeficiente de correlação.

Interpretação da correlação	**Coeficientes de correlação**		
	Cohen,1998	***Dancey and Reidy, 2006***	***Mukaka, 2012***
Muito forte	_		0,90 a 1,00
Forte	0,50 a 1,00	Acima de 0,70	0,70 a 0,90
Moderada	0,30 a 0,49	0,40 a 0,60	0,50 a 0,70
Fraca	0,10 a 0,29	Abaixo de 0,30	0,30 a 0,50
Insignificate			0 a 0,30

Fonte: Adaptado de [50, 51, 52].

Para calcular o coeficiente de correlação de Pearson entre as variáveis *x* e *y*, utiliza-se a Equação 3 a seguir:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left(x_i - \bar{x}\right)\left(y_i - \bar{y}\right)}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \bar{x}\right)^2\right]\left[\sum_{i=1}^{n}\left(y_i - \bar{y}\right)^2\right]}}. \tag{3}$$

Em que x_i e y_i são os valores do *i*-ésimo indivíduo.

Tanto a média quanto a variância desempenham um papel central na estimação desse coeficiente. Para análise de correlação de Pearson, duas condições que devem ser satisfeitas. A primeira manifesta que para estimar a correlação de Pearson, todas as variáveis devem ser quantitativas discretas e/ou contínuas. A outra anuncia que o coeficiente é afetado pela presença de valores destoantes, conhecidos com *outliers*, que podem exagerar ou diminuir a intensidade do relacionamento, logo, o teste é inadequado quando as variáveis do estudo não são normalmente distribuídas [48] .

Portanto, para aplicação do teste de correlação deve-se verificar primeiramente se os valores obedecem a uma distribuição normal (N (μ, σ)). Esse pressuposto é especialmente importante em amostragens pequenas. Isso porque, a partir do Teorema do Limite Central, sabe-se que na medida em que o número de observações aumenta, a distribuição das médias amostrais se aproxima da curva normal, independente do formato da distribuição dos dados na população [53].

Existem diferentes testes para estimar a normalidade da distribuição dos dados. O teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S), pela aplicabilidade, sem restrição a pequenas

amostras, normalmente é escolhido nestes casos. Os valores dos quantis da distribuição estatística do teste K-S são tabelados e podem ser encontrados em [54].

É importante observar que o coeficiente de Pearson não se refere a uma proporção, nem representa a força proporcional de um relacionamento [46].

2.2 *VALUE FOCUSED THINKING* (VFT)

O *Value Focused Thinking* (VFT), cuja abordagem tem o pensamento focado no valor, é definido como o processo que busca a identificação dos valores a serem utilizados pelo decisor para nortear o processo geral de decisão [55]. Neste contexto, observada a inexistência de uma técnica consolidada para avaliar as medidas de prevenção e combate a PNT, o método foi utilizado para identificar os objetivos do decisor, e consequentemente atribuir os critérios que representem de forma abrangente os objetivos do problema de avaliação das alternativas.

O VFT possui uma abordagem para tomada de decisão diferente das convencionais, por não se concentrar na comparação entre alternativas e consequências menos desejáveis. Morais *et al.* [56], em 2013, aponta que nos últimos anos, o VFT foi aplicado a uma gama de contextos a fim de identificar os objetivos dos tomadores de decisão. Dentro de [57], afirmam que o método é uma maneira de direcionar um recurso crítico conduzindo a melhores decisões. Keeney em [55], apresenta o VFT como um método que busca primeiro decidir o que se deseja e então, descobrir como alcançá-lo.

Nessa abordagem, o método se estende aos objetivos relevantes dos tomadores de decisão, incluindo objetivos que ainda não foram reconhecidos, destacando o papel da identificação dos objetivos em um problema de decisão, considerada mais relevante do que a comparação entre as alternativas conhecidas na solução do problema.

A aplicação do método permite que o foco seja na forma como os critérios são estabelecidos, destacando a necessidade de pensar sobre valores e objetivos. É por meio desta metodologia que se converte um problema de decisão com múltiplos objetivos em uma hierarquia quantitativa descritiva de valor. Desse modo, o valor assume uma significação de propósitos, desejos e/ou fins no sentido de atender ao que se pretende ser alcançado através da decisão, identificada como oportunidade de decisão [25]. Na oportunidade de decisão é realizado um processo criativo, baseado nas expectativas do decisor.

A aplicação de valores melhora o processo de decisão, sob três aspectos que caracterizam os objetivos: o contexto da decisão, um objeto e uma direção de preferência [58]. Keeney em [55], indica os valores como princípios a serem utilizados na avaliação, dentre os quais, os requerem maior atenção são explicitados pela identificação de objetivos. Os objetivos podem ser classificados em:

- Objetivos Fundamentais: são caracterizados pela relação com os fins valorizados pelos decisores em um contexto de decisão específico;
- Objetivos Meios: representam as implicações necessárias para que outro objetivo seja alcançado [55];
- Objetivos Estratégicos: são objetivos essenciais às decisões estratégicas, ou seja, a classe mais ampla de decisões que enfrenta uma organização [59].

Os passos propostos para implantação da abordagem VFT em problemas de decisão são: identificação dos objetivos; estruturação dos objetivos; construção da rede de objetivos fundamentais-meio e análise dos objetivos [55].

Existem várias técnicas para estimular e identificar objetivos envolvidos na estruturação de um problema, podendo ser feito por meio da criação de uma lista de desejos, de uma comparação do porquê uma alternativa é melhor do que a outra, do questionamento sobre os maiores problemas, dos impactos das alternativas, de uma listagem de objetivos e finalidades, ou por fim, da quantificação dos objetivos por meio da criação dos atributos [59].

A estruturação de objetivos consiste na avaliação do decisor quanto à importância de cada objetivo. De acordo com a posição do tomador de decisão é possível classificá-lo como fundamental, ou como objetivo meio [55].

Baseado na estruturação, é possível construir uma árvore que oferece uma visão organizada do processo de decisão. Os objetivos meios, também conhecidos como valores, são posicionados conforme hierarquia de valor identificada abaixo do objetivo fundamental, estabelecendo os pilares do VFT de análise de decisão. As hierarquias de valor buscam as propriedades de integralidade, não redundância, independência, operacionalidade e tamanho pequeno [60].

Por fim, os objetivos fundamentais são analisados para a identificação de oportunidades de decisão. Depois, segue-se com processos de raciocínio lógico para

identificar os mecanismos com que os objetivos fundamentais serão alcançados. Dessa forma, para medir cada objetivo, são estabelecidos os atributos, também conhecido como critérios, e suas métricas.

2.3 MÉTODOS MULTICRITÉRIO

A capacidade de tomar decisões é uma das características mais relevantes dos seres humanos. Algumas vezes, decisões simples, outras muitas, decisões complexas. A decisão é o processo que leva direta ou indiretamente à escolha de ao menos uma dentre várias diferentes alternativas, todas estas candidatas a resolver um determinado problema [61, 62]. Neste caso, o problema do decisor consiste em avaliar os múltiplos objetivos, de forma integrada. Tais objetivos, por sua vez, são avaliados por critérios.

Complementarmente, o termo critério, no contexto de uma decisão, normalmente está associado a uma forma de julgamento, implicando em algum tipo de padrão pelo qual um curso de ação, em particular, pode ser julgado mais desejável que outro. Assim, a consideração de diferentes cursos de ação torna-se um problema de decisão multicritério quando existe uma série de padrões de julgamento que conflitam de forma substancial entre si [63].

Naturalmente, o processo de tomada de decisões dependerá de diversos fatores culturais, econômicos, e psicológicos, além das habilidades, preferências e conhecimento disponíveis ao decisor [61, 64, 65, 62].

O aumento na velocidade das mudanças, o elevado volume de recursos financeiros, e o alto nível de incerteza dos ambientes competitivos, transformaram o processo de tomada de decisão em uma atividade de alta complexidade, passando a exigir do decisor uma melhor capacidade de julgamento [66].

Como consequência, surgem os métodos multicritério, uma área dentro da pesquisa operacional que reúne métodos de suporte à decisão com objetivo de superar à limitação da capacidade humana para análise de problemas. Desse modo, a utilização destes métodos tem o propósito de auxiliar na sistematização das informações e definições das preferências com relação aos atributos das alternativas a serem avaliadas [62].

Contudo, a escolha de um método específico dependerá de vários fatores: como: tipo de problema em análise, contexto considerado, atores envolvidos, estrutura de preferência do decisor, e o tipo de resposta que se deseja alcançar (problemática) [62, 67].

Diante disso, a problemática da tomada de decisão é caracterizada por um número crescente de alternativas e critérios conflitantes, para os quais os decisores necessitam selecionar, ordenar, classificar ou ainda descrever com detalhes as alternativas a serem escolhidas, considerando os múltiplos critérios a serem analisados [68]. Em síntese, as problemáticas são classificadas em: escolha, classificação, ordenação e descrição [65].

A problemática de escolha, ou seleção ($P.\alpha$) ajuda a escolher um subconjunto A' de um conjunto A, tão pequeno quanto possível, composto de alternativas julgadas como as mais satisfatórias. O resultado dessa problemática indica a decisão que poderia ser tomada ou identifica as melhores seleções baseadas numa metodologia que pode ser usada reiteradamente [69]. Problemas de otimização são casos particulares da problemática de escolha, onde A' fica restrito a uma única alternativa [70].

A problemática de classificação ($P.\beta$) equivale a formular o problema de decisão de tal maneira que distribua cada alternativa do conjunto A para em uma categoria predefinida. A distribuição de uma alternativa *a* para sua categoria apropriada é devida ao valor real intrínseco de *a* (e não pela comparação de *a* com outras alternativas de A) [69, 70].

A problemática de ordenação ($P.\gamma$) consiste em estabelecer uma ordem decrescente de preferência, parcial ou completa, no conjunto de alternativas A [70].

A problemática de descrição ($P.\delta$) descreve ações e as suas consequências em termos de qualidade e quantidade, em uma maneira formalizada e sistemática, e propõe uma metodologia baseada no procedimento cognitivo, que pode ser usada repetidamente [69, 70].

Além destas, pode ser considerada também a problemática de portfólio, que possui o propósito de selecionar um subconjunto de alternativas pertencentes a um conjunto inicial, de forma que este atenda a determinados objetivos, sujeitos a certas restrições [25].

Por outra perspectiva, os métodos de decisão multicritério podem ser classificados de diversas formas, uma delas divide os métodos em três grandes abordagens, de acordo com os princípios de modelagem de preferências: abordagem de critério único de síntese, sobreclassificação e julgamento interativo [65].

Na abordagem do critério único de síntese, que segue a tendência da Escola Americana, diferentes critérios são agregados dentro de uma única função de síntese, que pode ser posteriormente otimizada [71]. Nesse caso, devem-se analisar as condições de agregação da função e de construção do modelo. [72, 73]. Neste processo a abordagem está baseada na combinação de todos os critérios, com objetivo de obter uma avaliação global de todas as alternativas, a exemplos do método AHP, MACBETH e SMARTS [74].

A abordagem da sobreclassificação (*outranking*), inspirada na Escola Francesa, está baseada na construção de uma relação de sobreclassificação, que representa as preferências estabelecidas pelo decisor [63, 65]. São exemplos: ELECTRE e PROMETHEE.

Na abordagem do julgamento interativo, os métodos utilizam estruturas de programação matemática multiobjetivo para avançar em direção a solução por meio de sucessivas tentativas e erros [75].

Uma outra forma de classificação divide os métodos em compensatórios e não compensatórios de acordo com a racionalidade do decisor. Esta classificação está relacionada à compensação que pode existir entre os diferentes critérios no modelo de agregação. A classificação quanto ao tipo de racionalidade deve ser contemplada na análise do problema, quando se pretende atender à estrutura de preferência do decisor. Esta classificação influenciará na escolha do método para solução do problema [25].

No método compensatório existe a ideia de compensar um menor desempenho de uma alternativa em um dado critério por um melhor desempenho de outro critério. Isso significa que nos métodos compensatórios a avaliação de uma alternativa considera os *tradeoffs*, ou compensações entre os critérios. Nos métodos não compensatórios não há *tradeoffs* entre os critérios. Consequentemente, os métodos de sobreclassificação apresentam avaliações não compensatórias, enquanto os métodos de agregação por meio de critério único da síntese são compensatórios [25].

Além do mais, na identificação da racionalidade, se os desempenhos dos critérios são exclusivamente não compensatórios, a racionalidade é não compensatória, no entanto, se há ao menos um desempenho com racionalidade compensatória, a racionalidade é minimamente compensatória [76].

Em geral, os métodos de sobreclassificação não realizam uma agregação analítica para estabelecer um *score* para cada alternativa, e, assim facilitar a completa comparação

entre essas alternativas, como no caso de dos métodos de agregação através de um único critério [25].

Através da modelagem das preferências, pode-se representar a estrutura de preferência do decisor com relação as consequências, na análise de um problema de decisão. Um modelo de preferência é uma representação formal de comparações de elementos. A comparação entre dois elementos de um conjunto $A = \{a, b, c, ..., n\}$ é uma relação binária R. As propriedades das relações binárias são definidas em: reflexiva, irreflexiva, simétrica, assimétrica, completa e transitiva.

Nas modelações de preferência, as relações binárias são comumente denominadas de Relações de Preferências. As Relações de Preferências com mais destaque são:

- Indiferença (I): corresponde à existência de razões claras para o decisor que justificam a equivalência de dois elementos. Propriedades: Reflexiva e Simétrica.
- Preferência Estrita (P): corresponde à existência de razões claras para o decisor, que justificam a preferência significativa por um elemento. Propriedade: Assimétrica.
- Preferência Fraca (Q): corresponde à existência de razões claras para o decisor, que invalidam a preferência estrita em favor de um dos dois elementos. Propriedade: Assimétrica.
- Incomparabilidade (R): corresponde à existência de razões claras para o decisor, que não justificam qualquer das três situações precedentes. Propriedades: Simétrica e Irreflexiva.

As relações de preferência associadas podem compor várias estruturas de preferência. A seguir são apresentadas as estruturas de preferência de interesse particular para a modelagem de problemas com métodos multicritério:

- Estrutura (P, I): permite a obtenção de um pré-ordem completa entre as alternativas, pois não há incomparabilidades. Essa estrutura corresponde a modelo tradicional, no qual a maioria dos critérios únicos de síntese se enquadram.
- Estrutura (P, Q, I): também permite um pré-ordem completa, porém diferente da estrutura anterior possuem relações de preferência fraca.

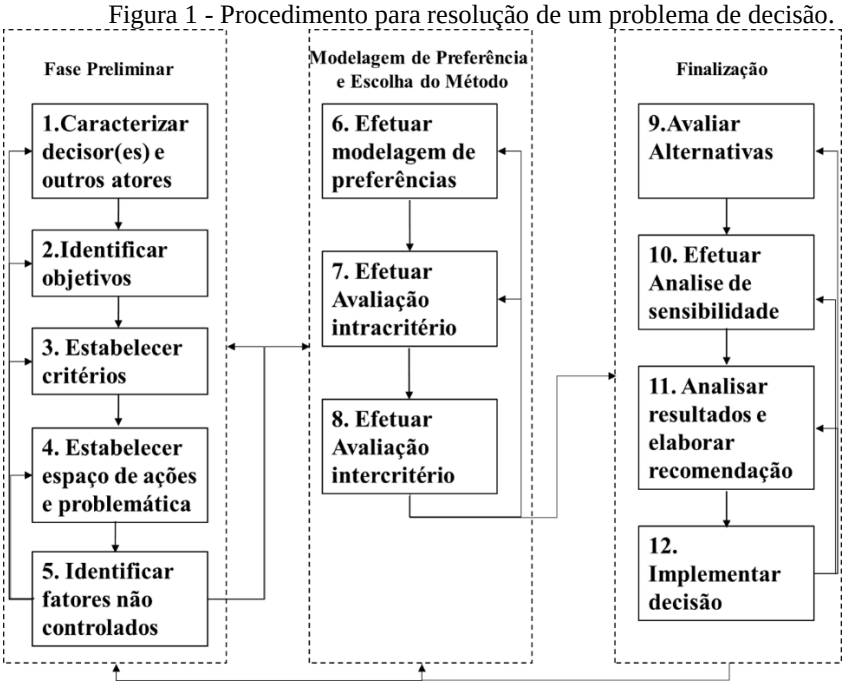
- Estrutura (P, Q, I, R): apresenta relação de incomparabilidade. Este tipo de estrutura leva a construção de pré-ordens parciais entre elementos do conjunto.

Diferentemente dos métodos de agregação em critério único de síntese, os métodos de sobreclassificação assumem a possibilidade de incomparabilidade na estrutura de preferência do decisor, usando uma relação que não é transitiva [25].

Na perspectiva de Bouyssou *et al.* [77], é a modelagem de preferências que trata com o significado dos dados no contexto da decisão. Essa modelagem tem a função não só de transformar as preferências em informações, mas de lidar com situações de incertezas. Além disso, o procedimento permite incorporar ao modelo informações subjetivas do decisor.

Adicionalmente, um procedimento para resolução de um problema de decisão, é detalhado seguir, compreendendo três fases principais, divididas cada uma, em várias etapas. A cada fase e etapa, aplicam-se refinamentos sucessivos, que envolvem recursividade [25]. Na Figura 1 está apresentado o procedimento:

Figura 1 - Procedimento para resolução de um problema de decisão.



Fonte: [25].

Conforme apresentado na Figura 1, a fase preliminar inclui cinco etapas, nas quais são estruturados os elementos básicos do problema. Esses elementos podem influenciar de modo definitivo o modelo final. A primeira etapa desta fase é a caracterização do

decisor e demais atores. A caracterização do decisor compreende esclarecer o tipo do envolvimento, direto ou indireto, e o modo de participação, individual ou em grupo. Para cada objetivo estabelecido, será estabelecido um critério ou atributo que o represente no processo de modelagem quantitativa, de tal forma que atendam à exaustividade, à consistência e à não redundância. A etapa seguinte desta fase envolve três atividades: o estabelecimento da estrutura do espaço de ações, a determinação da problemática e a geração de alternativas para solução do problema. Por fim, é realizada a avaliação e identificação de fatores que não estão sob o controle do decisor [25].

Na segunda fase, são estruturados os fatores que influenciam a escolha do método de decisão. Nesta fase são desenvolvidas as etapas relativas à modelagem de preferência. Na modelagem de preferência deve-se avaliar a estrutura de preferência mais adequada para representar as preferências do decisor. Outra questão importante nesta etapa é o estabelecimento da racionalidade, compensatória ou não compensatória. Ao final desta etapa deve-se selecionar um método multicritério de forma preliminar, que servirá para execução das etapas 7 e 8. A etapa de avaliação intracritério consiste na elicitação da função utilidade/valor para cada atributo/critério estabelecido para os métodos do critério único de síntese, e na avaliação de questões de limiares de indiferença e preferência para os métodos de sobreclassificação. É importante observar que nesta etapa, de acordo com o método, poderá ser necessário efetuar o processo de normalização. Na última etapa desta fase, efetua-se a parametrização do método estabelecido, obtendo informações de intercritério, junto ao decisor. As informações intercritério permitem efetuar a combinação quantitativa dos critérios para o processo de agregação com vista à avaliação das alternativas. Ao final desta fase o método de decisão é escolhido e o modelo de decisão construído [25].

A última fase inicia-se com a avaliação das alternativas, com o modelo de decisão já consolidado e pronto para ser utilizado. Assim, tem-se a efetiva aplicação do método multicritério, utilizando as preferencias do decisor, conforme a problemática estabelecida. Na etapa seguinte é efetuada a análise de sensibilidade que confronta a robustez do modelo em relação aos dados de entrada e aos parâmetros empregados, avaliando o impacto provocado na saída do modelo, por variações na entrada, essencial para o refinamento do modelo. As etapas seguintes consistem em analisar os resultados, elaborar recomendações e implementar a decisão [25].

Como observado, uma etapa relevante para a solução do problema de decisão multicritério, é a escolha do método a ser aplicado. Dessa forma, no Quadro 1 são apresentados alguns métodos multicritérios.

Quadro 1 – Métodos Multicritério.

Critério único de síntese (Compensatórios)	Sobreclassificação (Não compensatórios)
MAUT	ELECTRE I
SMARTS	ELECTRE II
MACBETH	ELECTRE III
AHP	ELECTRE TRI
TOPSIS	PROMETHÉE I
SMARTER	PROMETHÉE II
FITradeoff	PROMETHÉE III

Fonte: autoria própria.

Dado que, para ordenação em preferência das diferentes medidas orientadas para prevenção e controle das PNT, a racionalidade identificada é compensatória, e representada por uma estrutura de preferência (P, I) sem incomparabilidades, a abordagem em critério único de síntese mostra-se mais adequada. Neste propósito, na seção seguinte serão apresentados um melhor detalhamento dos métodos de agregação aditivos.

2.3.1 MÉTODOS DE AGREGAÇÃO ADITIVOS

O método de agregação aditivo, corresponde ao típico método de critério único de síntese. Existem diversos métodos com essa forma de abordagem, que se diferenciam entre si em função do processo de modelagem de preferência.

O procedimento de agregação aditivo mais utilizado é o modelo aditivo determinístico, que se baseia na *Multi-Attribute Value Theory* (MAVT), devido sua forte estrutura axiomática. O método utiliza uma função de valor com abordagem compensatória para mensurar o desempenho global das alternativas. A mensuração da função valor $v_i\ (x_{ij})$ para cada critério i é realizada pela avaliação intracritério. Para obtenção da função valor global $v\ (a_j)$ tem-se [78, 79]:

$$v(a_j) = \sum_{i=1}^{n} k_i \, v_i \, (x_{ij}). \quad (4)$$

Considerando um problema multicritério com *n* critérios, onde $v\ (a_j)$ é o valor global de alternativa a_j para o tomador de decisão, k_ié a constante de escala do critério *i*, e $v_i(x_{ij})$ é a função marginal que indica o valor da performance da alternativa a*j* no critério *i* normalizada numa escala numa escala de 0 a 1.

Em modelos aditivos, a definição dos valores das constantes de escala (pesos) é um processo complexo e muito importante, uma vez que os pesos não representam apenas o grau de importância dos critérios, mas também um fator de escala relacionando aos valores das consequências. Devido a esses fatores, a determinação das constantes de escala é considerada o centro de qualquer processo de tomada de decisão em modelos aditivos [80].

Dentre os procedimentos para elicitação das constantes de escala em modelos aditivos, merecem destaques: o Procedimento de Razão (AHP), o *Swing* (SMART, SMATER, MACBETH), e o *Tradeoff* (FITradeoff) [72, 74]. Também há métodos que não utilizam procedimento estruturado, como exemplo o TOPSIS.

Como observado, o procedimento *Swing* é utilizado por diversos métodos, dado a sua simplicidade, que reflete na sua fácil aplicação, porém restrito a função valor linear [74, 81]. Todavia altas de inconsitências devido a erros de modelagem são reportadas a este procedimento [82]. Por outro lado, o procedimento *Tradeoff* é caracterizado por sua forte estrutura axiomática, aplicabilidade a função valor não linear, porém é de difícil aplicação para decisor [83].

Durante o processo de elicitação de constantes de escala e obtenção do desempenho global das alternativas para modelo aditivo *Tradeoff* tradicional desenvolvido por Keeney & Raiffa [72], o decisor é questionado sobre as relações entre pares de constantes de escalas adjacente, de forma que seja obtida uma ordem de importância relativa entre os critérios.

$$k_1 > \cdots > k_i > k_{i+1} > \cdots > k_n. \quad (5)$$

As constantes de escala dos critérios são normalizadas de acordo com a Equação 6:

$$\sum_{i=1}^{n} k_i = 1\,, com\ k_i \geq 0. \quad (6)$$

Apesar das vantagens do *Tradeoff* tradicional, este método não é amplamente utilizado porque demanda informações completas do decisor, a fim de apontar a exata indiferença entre duas consequências, o que aumenta o esforço cognitivo do processo, provocando elevados índices de inconsistência ao ser aplicado [80, 82].

Semelhantemente, ao executar aplicações reais, o processo para estabelecer os parâmetros pode ser uma tarefa cognitivamente exigente para os decisores. Nesses casos, a informação disponível é frequentemente incompleta [84, 85, 86].

Por conseguinte, vários métodos de formação com informações parciais foram desenvolvidos com o objetivo de reduzir o esforço cognitivo durante a elicitação de constantes de escala, dentre eles o *Flexible and Interactive Tradeoff* (FITradeoff). Assim, o procedimento de elicitação FITradeoff foi desenvolvido com objetivo de melhorar a aplicabilidade do *Tradeoff* tradicional, tornando o método mais fácil para o decisor, sem perder a sua estrutura axiomática [80].

Desse modo, o FITradeoff é utilizado em circunstâncias nas quais o tomador de decisão é incapaz de especificar sua preferência com os detalhes exigidos pelos métodos tradicionais. A utilização de informações parciais, também permite que a estrutura de preferências do decisor seja sistematicamente alterada de acordo com a evolução do processo de aprendizagem [87, 88].

Na literatura ainda estão disponíveis outros procedimentos de elicitação que utilizam informações parciais. O método SMATER [74] é uma das proposições, e analisa desigualdades para pesos, a fim de eliminar a alternativa inferior. Uma segunda abordagem, utiliza um centroide de ordem de classificação (ROC) para as constantes de escala, calculando a média dos pontos extremos do espaço de peso [74]. Contudo ambos, são caracterizados pelos erros de modelagem que geram elevadas taxas de inconsistências.

Outro método de elicitação para problemas com informações incompletas, o UTA (*Utilité Additive*) [89], propõe uma abordagem baseada na avaliação holística das alternativas. Com o mesmo propósito o TOPSIS (*Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution)* [90] tem concepção baseado em soma ponderada, e exige muito cuidado em seu processo de normalização. O problema é que estes procedimentos não refletem necessariamente a preferência do decisor.

Portanto, para solução do problema de ordenação em preferência das diferentes medidas orientadas para prevenção e controle das PNT, a ser realizada a partir de informações parciais, com baixo esforço cognitivo do decisor e racionalidade

compensatória, o método FITradeoff mostra-se mais apropriado. Partindo deste princípio, torna-se evidente a relevância de um melhor detalhamento sobre o FITradeoff, em especial aplicado a problemática da ordenação, a serem realizadas nas próximas seções.

2.3.2 FITRADEOFF

Como já mencionado, umas das questões mais relevantes no uso de um modelo de decisão multicritério é provavelmente estabelecer as constantes de escalas dos critérios, ou seja, avaliar os pesos. Isso é particularmente relevante para um modelo de agregação aditivo [80]. Vários dos procedimentos, incluindo o *Tradeoff* tradicional, requerem informações completas do tomador de decisão para realizar o ajuste da indiferença entre duas alternativas [83]. Desse modo, os métodos de suporte a decisão de informação completa exigem do decisor uma estrutura de preferência definida e estável, que demanda muita precisão, tempo e esforço cognitivo [63]. Esta dificuldade se traduz em altas taxas de inconsistências [83].

Em vantagem, o método FITradeoff, aplicado na resolução de questões que detêm informações parciais, concede flexibilidade a estrutura de preferência do decisor a cada interação do processo, exigindo menos esforço cognitivo, o que converte em melhores taxas de consistência [91]. Com objetivo de comprovar a capacidade da técnica são aplicadas análises de sensibilidade, apropriadas a demonstrar sua robustez [92].

De fato, o FITradeoff está fundamentado no procedimento de *Tradeoff* tradicional [93], trazendo para si a robustez da estrutura axiomática. Entretanto, enquanto o *Tradeoff* trabalha com equações obtidas através das relações exatas de indiferença entre as consequências para mensuração da constante de escala *k*, o FITradeoff, busca resolver um problema de programação linear (PPL) utilizando-se de inequações obtidas através das relações de preferência estrita entre as consequências (informação parcial), o que reflete em menos esforço cognitivo, e melhores taxas de consistência.

Neste contexto, foi concebido inicialmente, o método FITradeoff com a finalidade de atender a problemática de escolha, utilizando informações parciais de acordo com o escopo MAVT, através do desenvolvimento de um sistema de apoio a decisão (SAD) [80]. Em seguida, uma nova versão para problemas da ordenação foi apresentada Frej *et al.* [79], agregando o conceito de relações de dominância na obtenção do ordenamento parcial ou completo das alternativas, incluída a oportunidade de observar graficamente as relações a cada interação.

Durante o procedimento de elicitação, em cada interação com o SAD, o decisor dá declarações de preferência com base em um processo estruturado. Todavia, no modelo flexível e interativo é dispensável que o decisor necessite fazer ajustes para a indiferença ao comparar alternativas.

O conceito de elicitação flexível também está associado ao contexto de construção do modelo de valor multicritério. Essa flexibilidade significa que o procedimento de elicitação pode ser alterado e adaptado em diferentes condições à medida que as circunstâncias ocorrem. No procedimento flexível, o método utiliza informações parciais do decisor para buscar uma solução do PPL a cada novo nível de informação obtida. Neste processo, as etapas são escolhidas de acordo com as diferentes condições que surgem, de forma que se espera que o decisor forneça ao final uma menor quantidade de informações do que no processo tradicional [80], exigindo assim menos esforço cognitivo na especificação de suas preferências [94].

Para isso, o SAD avalia sistematicamente a possibilidade de encontrar uma solução para o problema, por meio de um processo flexível e interativo de perguntas e respostas com o decisor. As informações parciais são usadas como rankings ou limites de pesos, de acordo com abordagem de compensação. A saída é gerada na etapa de síntese com base em modelos de PPL [80].

Ao longo das etapas do FITradeoff, um espaço de constantes de escalas é considerado, e atualizado a cada interação do decisor, com o propósito de reduzir o subconjunto de alternativas potencialmente ótimas. O conceito de alternativa potencialmente ótima é dado a alternativa que possui o maior valor global, para ao menos um vetor de pesos dentro do espaço de pesos dos critérios [95].

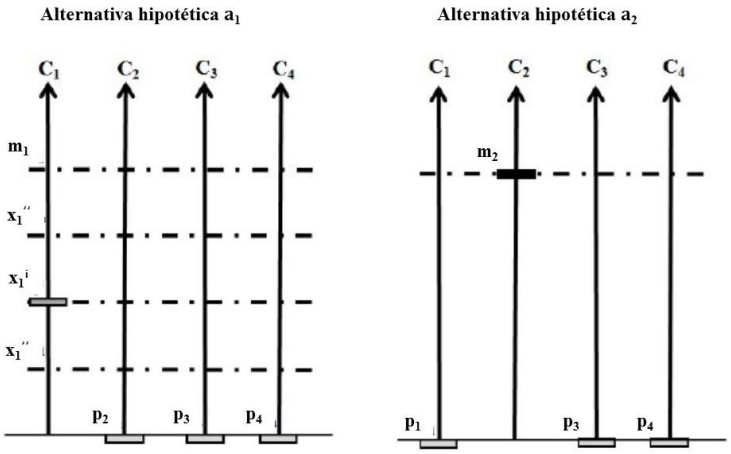
Como já observado, o FITradeoff não busca encontrar valores exatos para as constantes de escalas dos critérios. Alternativamente, o método usa as informações parciais do decisor em forma de desigualdades, atualizando o espaço de pesos com a nova informação obtida [92].

O método FITradeoff [79] pode ser dividido em duas etapas. A primeira etapa corresponde a ordenação das constantes de escalas dos critérios considerando seu espaço de consequências, também utilizado no *Tradeoff* tradicional. E a segunda etapa trata com o processo de elicitação flexível. Neste último, o decisor expressa suas preferências com relação ao desempenho entre duas alternativas, a_1 e a_2.

Em [79], Frej *et al.* descreveram analiticamente o funcionamento do método para solução de um problema. Na interação com o SAD o decisor é solicitado a comparar duas

alternativas hipotéticas a_1 e a_2 considerando as compensações entre os critérios (Figura 2).

Figura 2 - Comparação das consequências no método FITradeoff.



Fonte: adaptado de [80].

Como uma ilustração suponha-se que a_1 e a_2 tem, respectivamente, vetor de consequências $x^{a_1} = \left(x_1^{a_1}, x_2^{a_1}, \dots x_n^{a_1}\right)$ e $x^{a_2} = \left(x_1^{a_2}, x_2^{a_2}, \dots x_n^{a_2}\right)$ no qual a_1 tem uma performance intermediária no primeiro dos critérios, tal que $Pior_1 < x_1'^{a1} < Melhor_1$, e tenha a pior performance possível para os demais critérios, tal que $x_2^{a_1} = Pior_2, \dots, x_n^{a_1} = Pior_n$, enquanto a_2 tem a melhor performance no segundo critério $x_2^{a2} = Melhor_2$, e pior performance para os demais critérios $x_1^{a_2} = Pior_1, x_3^{a_2} = Pior_3, \dots, x_n^{a_2} = Pior_n$, assumindo que $k_1 > k_2 > k_3 > \cdots > k_n$. A partir da ordem de classificação dos critérios, o espaço de pesos é definido por:

$$\varphi_n = \{(k_1, k_2, k_3, \dots, k_n) | k_1 > k_2 > \cdots > k_n; \sum_{i=1}^{n} k_i = 1; k_i \geq 0\}. \tag{7}$$

De acordo com o MAVT, uma vez que as funções marginais são aplicadas levam o $Pior_i = 0$ e o $Melhor_i = 1$ para qualquer i. No FITradeoff, o decisor é solicitado a especificar suas preferências entre alternativas hipotéticas deste tipo. Se o decisor preferir x^{a_1} a x^{a_2} , então a desigualdade $k_1 v_1\left(x_1'^{a_1}\right) > k_2$ é obtida, caso contrário $k_1 v_1\left(x_1'^{a_1}\right) < k_2$ é obtida [92]. Com as desigualdades obtidas a partir das informações prestadas pelo decisor durante o processo de elicitação, uma nova região viável de constate de escalas φ é calculada, tal que:

$$\varphi = k_1 > k_2 > \cdots > k_n | \sum_{i=1}^{n} k_i = 1 \tag{8}$$

$$k_i v_i(x_i') > k_{i+1}\ i = 1\ para\ n - 1$$

$$k_i v_i(x_i'') < k_{i+1}\ i = 1\ para\ n - 1$$

$$k_i \geq 0, i = 1 \dots n$$

No sentido que:

$$\begin{aligned} v_i(x_i') &> k_{i+1}/k_i \\ v_i(x_i'') &< k_{i+1}/k_i. \end{aligned} \tag{9}$$

Onde a primeira linha da equação (8) reflete a ordem de classificação das constantes de escala do critério dado pelo decisor, a última linha garante que as constantes de escala tenham valores não negativos, e as desigualdades são obtidas de acordo com as declarações de preferência estritas dadas pelo decisor durante o processo de elicitação, para x_i'e x_i'' valores da consequência no critério *i* [80].

Sistematicamente os pesos dos critérios de FITradeoff se desenvolvem a partir do exame das informações obtidas por um processo flexível e definem um novo espaço viável para as constantes de escalas (10), reduzindo a cada interação, sempre observando que se trata de um subespaço de (7).

$$\varphi_n = \begin{cases} (k_1, k_2, k_3, \dots, k_n) | \sum_{i=1}^{n} k_i = 1; k_i \geq 0 \\ k_1 > k_2 > \cdots > k_n \\ k_1 v_1(x_1') > k_2 > k_1 v_1(x_1'') \\ k_i v_1(x_i') > k_{i+1} > k_i v_1(x_i'') \\ k_{n-1} v_1(x_{n-1}') > k_n > k_{n-1} v_1(x''_{n-1}). \end{cases} \tag{10}$$

A medida que o decisor continua a dar mais informações durante o processo de elicitação, a região viável φ é atualizada com essas novas informações, e a performance da alternativa é verificada, por meio de um PPL, cuja a função objetiva neste caso é:

$$Max \sum_{i=1}^{n} k_i v_i\ (a_j) \tag{11}$$

De acordo com a performance da alternativa no espaço de pesos (10), as alternativas são classificadas em três diferentes situações [80]:

- Potencialmente ótima – uma alternativa potencialmente ótima, tem o valor global maior ou igual ao valor de qualquer outra alternativa *j* de todo o conjunto de alternativas, para pelo menos um vetor de pesos em todo o espaço de peso, dado pela Equação 10.
- Dominada - uma alternativa dominada, tem o valor global, menor do que o valor global de pelo menos uma das alternativas do subconjunto de alternativas potencialmente ótimas, qualquer que seja o vetor de pesos em todo o espaço de peso, dado pela Equação 10. Uma alternativa dominada é uma alternativa não potencialmente ideal;
- Ótima - uma alternativa ótima, tem o valor global, conforme fornecido por (função valor), maior do que o valor de qualquer outra alteração *j* nativo de todo o conjunto de alternativas, qualquer que seja o vetor de pesos em todo o espaço de peso é, dado pela Equação 10. A alternativa ótima domina cada uma das alternativas *j* do todo conjunto de alternativas, em todo o espaço de peso em (10).

Além das desigualdades da região viável φ, na Equação 12 o modelo PPL tem uma restrição adicional, para garantir que o valor da alternativa *j* seja maior do que o valor de todas as outras alternativas, para ao menos um vetor de pesos dentro da região viável [79]:

$$\sum_{i=1}^{n} k_i v_i \left(a_j\right) \geq \sum_{i=1}^{n} k_i v_i \left(a_z\right), z = 1,2, \dots n, z \neq j \tag{12}$$

Se o modelo PPL com a função objetivo (11) e restrições (8) e (12) tem uma solução, então isso significa que a alternativa a_j é potencialmente ótima, ou seja, que existe pelo menos um vetor de peso na região viável que torna o valor de a_j maior que os valores de todas as outras alternativas. Caso contrário, a alternativa a_j não é potencialmente ótima, portanto, é eliminado do processo [79].

O decisor continua respondendo às questões de elicitação até que uma solução única seja encontrada pelo modelo PPL, ou seja, até que uma única alternativa seja considerada potencialmente ótima para o espaço atual de peso, denominado espaço de peso final φ_F.

2.3.3 FITRADEOFF APLICADO À PROBLEMÁTICA DE ORDENAÇÃO

Para os problemas de ordenação, o método busca revelar, ao final da interação, uma ordem para as alternativas de acordo com a preferência do tomador de decisão. Sendo assim, diferente do que acontece em modelos aditivos com informação completa, para o qual é obtido um único vetor de peso ao fim do processo para avaliar as alternativas [72, 74], e do FITradeoff aplicado a problemática da escolha, no qual um espaço φ_F composto por um conjunto de vetores é alcançado, na aplicação para ordenação ocorre que diferentes vetores de peso em φ_F resultam em diferentes ordens finais para as alternativas, embora todos indiquem a mesma alternativa para o primeiro lugar do *ranking*.

Assim sendo, diferentemente do problema de escolha, em que o conceito de otimização potencial é suficiente para conduzir a análise, no problema de ordenação as alternativas devem ser comparadas entre si e as relações de preferência verificadas. Com o propósito de construir uma ordenação - parcial ou completa - a partir das informações disponíveis, as relações de dominância entre alternativas para o nível de informações parciais obtidas deverão ser verificadas [79]. Portanto, em cada etapa, a dominância deve ser analisada para cada par de alternativas (a_j, a_k), pelo seguinte PPL executado:

$$\max D(a_j\ , a_k) = \sum_{i=1}^{n} k_i v_i\ (a_j) - \sum_{i=1}^{n} k_i v_i\ (a_k). \tag{13}$$

Dado que:

$$k_1 > k_2 > \cdots > k_n | \sum_{i=1}^{n} k_i = 1$$

$$k_i v_i(x_i') > k_{i+1}\ i = 1\ para\ n - 1$$

$$k_i v_i(x_i'') < k_{i+1}\ i = 1\ para\ n - 1$$

$$k_i \geq 0, i = 1 \ldots n$$

Teorema 1: Considere o valor ideal *D* de (13):

(a) Se $D\ (\ a_j\ , a_k\ ) < 0$, então a_k domina a_j em relação a φ.

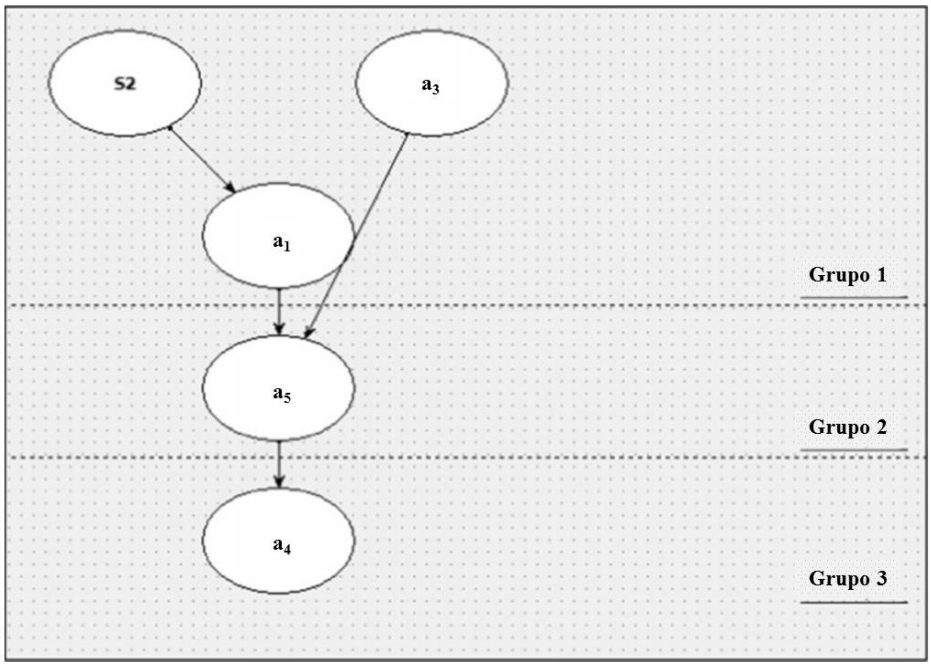
(b) Se $D\ (\ a_j\ , a_k\ ) \leq \varepsilon$ e $D\ (\ a_k\ , a_j\ ) \leq \varepsilon$, então a_j e a_k são indiferentes em relação a φ .

(c) Se $D\ \left(\ a_j\ , a_k\ \right) > 0$ e $D\left(a_k\ , a_j\right) > 0$, e também maior que ε(ε> 0), então a_j e a_k são incomparáveis para o nível atual de informação parcial φ.

À medida que o decisor responde às perguntas no SAD FITradeoff, mais restrições são obtidas, de modo que o espaço das constantes de escala vai diminuindo. Dessa forma, uma matriz de dominância em pares pode ser obtida a partir de Equação 13, a cada ciclo. A transitividade da relação de preferência permite reduzir o esforço computacional. A partir da matriz de dominância dos pares, é possível construir uma classificação - parcial ou completa - das alternativas, a cada ciclo. Baseado na ordenação das alternativas obtida, o SAD constrói o de diagrama de visualização de ordenação, similar ao diagrama de Hasse [79].

O diagrama de visualização de ordenação (Figura 3) é uma ferramenta útil, pois permite que o decisor analise visualmente as relações de dominância entre alternativas a qualquer momento do processo de elicitação. Uma das vantagens do diagrama proposto, é a redução da transitividade, que facilita a visualização, e evita o esforço cognitivo e desnecessário [96].

Figura 3 - Exemplo de diagrama de Hasse visualização de ordenação (FITradeoff).



Fonte: adaptado de [91].

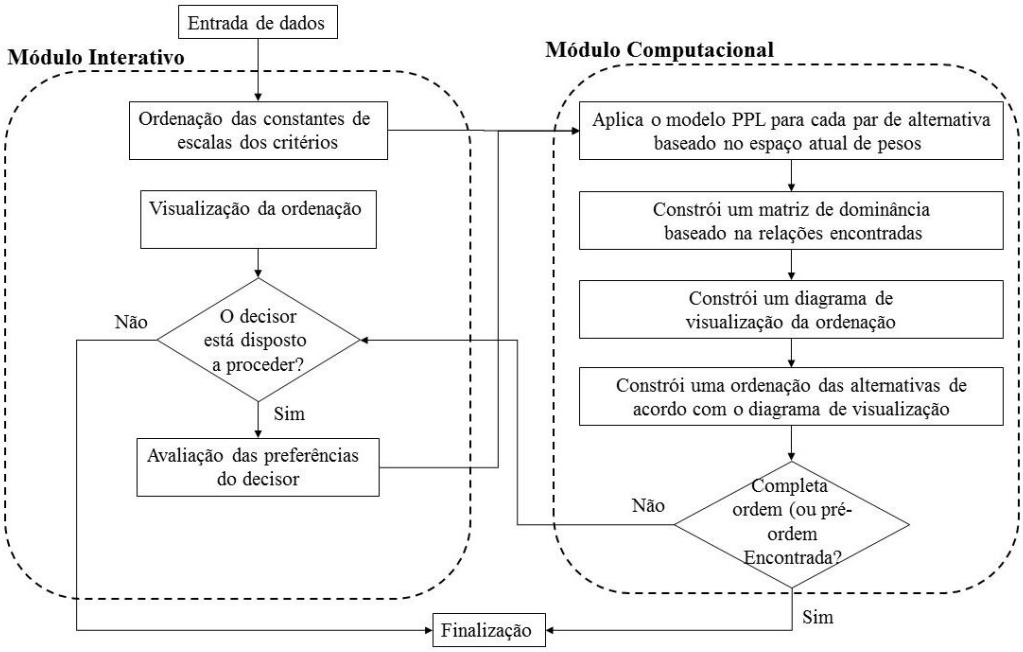
Neste diagrama, os círculos representam as alternativas, as setas direcionais pretas indicam a relação de dominância definida pela elicitação por decomposição, e os traços pontilhados indicam a segmentação das posições. Os diagramas também podem conter setas vermelhas indicando a relação de dominância estabelecidas por avaliação holística, e linhas acinzentadas sem indicação de direção, que revelam relações de indiferença [79].

Um fluxograma retratando o funcionamento do FITradeoff SAD para a problemática de ordenação, divididos em dois módulos básicos, processo interativo e etapas computacionais de aplicação do SAD, é apresentado na Figura 4.

No módulo computacional é possível observar as etapas do algoritmo referente a ordenação das alternativas, realizada a partir da verificação da relação de dominância no nível de informações parciais obtidas no momento. Dessa forma, em cada etapa a dominância deve ser verificada para cada par de alternativas(a_j, a_k), pela PPL definida na Equação 13.

A execução do SAD inicia-se com a entrada da matriz de consequência por meio de uma planilha eletrônica, ou pela imputação das informações com apoio de um analista que orienta o decisor. A matriz de consequência, também conhecida como matriz de avalição, é composta por todas as funções de valor (v_i (x_{ij})), correspondente ao desempenho de cada alternativa *j* em cada critério *i*.

Figura 4 - FITradeoff para problemática de ordenação.



Fonte: adaptado de [79].

Após a inserção dos dados, o decisor é solicitado a classificar as constantes de escala dos critérios, desempenhada por avaliação holística ou por comparação entre pares de acordo com a flexibilidade do sistema. Pela avaliação holística para ordenação relativa dos critérios, o SAD apresenta uma alternativa hipotética, e solicita ao decisor que escolha o critério que supostamente seja mais vantajoso melhorar ao máximo o desempenho, colocando-os em sequência de preferência, dentre os critérios ainda não analisados. A escolha de um determinado critério indica que o valor de sua constante de escala é maior do que os valores das constantes dos critérios ainda não selecionados, embora o valor da constante ainda não seja conhecido.

A ordenação dos pesos de critérios forma um espaço de peso inicial que atua como restrição para a primeira rodada do modelo PPL, com o propósito de encontrar relações de dominância entre alternativas. Encontrada as relações de dominância, o diagrama de visualização de ordenação é construído baseado nas instruções, estabelecendo um ordenamento parcial ou completo. Se uma ordem completa for encontrada neste ponto, o processo finaliza. Caso contrário, o decisor poderá acessar o diagrama de visualização de ordenação, de modo a decidir se a classificação parcial obtida é suficiente para os seus fins. Se porventura os resultados parciais apurados satisfaçam o objetivo do decisor, ele pode optar por interromper o processo de elicitação, senão o procedimento continua para que suas preferências sejam avaliadas, através da comparação entre pares de alternativas hipotéticas considerando as compensações entre os diferentes critérios.

Alternativamente, devido a flexibilidade do processo, o tomador de decisão pode optar em cada etapa pela avaliação holística para seguir com o processo de ordenação das alternativas.

A cada nova pergunta respondida pelo decisor relacionada a comparação entre duas alternativas hipotéticas, uma nova desigualdade entre as constantes de escalas é obtida, de modo que atualiza o espaço de pesos e seja novamente executado o PPL a procura de novas relações de dominância que redefina a ordenação. Destaca-se que o procedimento deve ser repetido até que uma ordenação completa seja encontrada, ou até o momento em que o decisor se satisfaça com o resultado apresentado e decida não fornece mais informações, optando por interromper o processo de elicitação. A possibilidade de interrupção do processo antes do final da elicitação, reforça a flexibilidade do método FITradeoff.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Regularmente, são discutidas entre pesquisadores, engenheiros e técnicos de regulação do setor elétrico, novas técnicas de monitoramento, prevenção e combate a PNT. Consequentemente, observa-se um expressivo número de novas soluções e aperfeiçoamentos de técnicas já existentes, com objetivo de detectar, classificar e prevenir fraudes. Neste capítulo são apresentados alguns trabalhos que retratam a evolução das estratégias utilizadas, iniciando pela exploração das produções acerca dos mecanismos operacionais (MO) utilizados no enfrentamento a PNT, seguido pelos estudos relativos às técnicas de mineração de dados (MD) empregadas na identificação de consumidores irregulares, e por fim, algumas pesquisas que utilizaram métodos multicritérios de apoio a decisão (MCDA/M) para solução de problemas envolvendo energia.

3.1 MECANISMOS OPERACIONAIS

Embora os mais recentes trabalhos concentrem-se em ferramentas de análise de dados para detectar perdas, vários outros estudos que apresentam mecanismos operacionais, comumente renomados por medidas de prevenção e controle de perdas não-técnicas, foram publicados.

Alves *et al.* [13], em 2006, descreveram a implantação de um sistema de combate a PNT, por meio da instalação de caixas de distribuição elétrica blindadas nos topos de postes, associado à substituição de medidores eletromecânicos por eletrônicos, em Caracas na Venezuela. A instalação de caixa blindadas com terminais de conexão protegidos e novos medidores, representam uma redução de 40 a 60% nas PNT. Destacaram que os medidores eletrônicos conservam sua exatidão, sem a necessidade de calibração, por um período de operação até três vezes maior que os equipamentos

eletromecânicos. Dessa forma, concluíram que a instalação de novos medidores reduz as perdas provocadas pela falta de calibração dos dispositivos antes instalados.

Também em 2006, Gonzalez *et al.* [97], apresentaram ferramentas de detecção e controle a fraudes, com destaque para instalação de medição totalizadora em circuitos de distribuição. No desenvolvimento das ações em campo, inovaram com a aplicação de parafusos especiais, conhecidos como parafusos de segurança, efetivos nas blindagens das unidades consumidoras. Em conjunto expuseram os benefícios gerados pelas intervenções administrativas, pelo acompanhamento de indicadores e pela interação com as lideranças comunitárias. Observaram que o apoio dos líderes comunitários foi determinante para o sucesso das medidas, demonstrando que a integração cliente-fornecedor é uma ferramenta válida e eficaz para o combate a perdas.

Em 2009, Peralta *et al.* [9], descreveram uma metodologia para cálculo de PT e PNT, implementadas com sucesso em uma concessionária de energia canadense. O método calcula com exatidão PT de energia em sistemas de distribuição por meio de técnicas de modelagem e simulações de fluxo de carga, utilizando informações do perfil de carga, dados do sistema de informação geográfico (GIS) e fator de carregamento do circuito. Enquanto as perdas técnicas são calculadas por modelagem, as PNT são determinadas pela diferença entre as perdas totais na distribuição e as PT. Propuseram a implantação de medição inteligente, para contribuir com a exatidão das informações coletadas para modelação. Ressaltaram que a exatidão e automatização do processo, garante uma ação eficaz no combate a PNT.

Depuru *et al.* [2], em 2010, apresentam a relação do roubo de eletricidade com aspectos políticos, sociais e econômicos. Identificaram que os elevados preços desestimulam a compra de eletricidade, o que contribui com crescimento da taxa de PNT. Descreveram os efeitos das perdas na qualidade e na tarifa de energia. Discorreram sobre métodos de roubo de eletricidade, em especial, a fraude no medidor. Também apresentaram métodos de detecção e estimativa de PNT, por meio da instalação de medição fiscalizadora, medidores inteligentes, etc. Mostraram medidas implementadas para redução de perdas, como: tarifa social, inspeções periódicas, manutenção em rede de distribuição, entre outras.

Em 2012, Agüero [11], apresentou tecnologias, metodologias e abordagens operacionais destinadas a melhorar a eficiência dos sistemas de distribuição de energia, com ênfase na redução de perdas. Na perspectiva de contenção de PT, discorre sobre os benefícios da instalação de vários equipamentos, como: bancos de capacitores,

reguladores de tensão, reconfiguração automática do alimentador, entre outros. Do ponto de vista da redução de PNT, apresenta as vantagens das redes inteligentes, tais como: consumo pré-pago, medição totalizadora, sistema conexão e desconexão remota, etc. Destacam ainda que as instalações de medições totalizadoras representam uma redução de 8% nas PNT.

Posteriormente, Penner *et al.* [12], em 2014, utilizaram um dispositivo de medição fiscalizadora em transformadores para identificar circuitos de distribuição com elevadas taxas de PNT. Retrataram o processo de medição e coleta de informações para análise, conhecido como "campanha de medição", com o objetivo de comparar medições coletadas do terminal de baixa tensão do transformador, com os dados dos medidores de energia dos consumidores do circuito. Avaliaram também a alteração do perfil de carga nestes circuitos. Sugeriram comunicação GPRS (*General Packet Radio Service*) entre a medição fiscalizadora e a central de operação.

Em 2015, Gawlak [6], investigou o impacto de investimentos em infraestrutura da rede de distribuição para redução de perdas técnicas e comerciais. No estudo identifica-se que as perdas comercias representam cerca de 21,8% das perdas totais. Além disso, conclui-se que as perdas totais variam de 6,57% a 12,36% da energia injetada para os circuitos avaliados, devido a variação das PNT, em uma concessionária distribuidora na Polônia. O estudo também pondera que os investimentos em infraestrutura reduzem significativamente as perdas, e que o mesmo método e meio aplicado podem produzir resultados diferentes de acordo com o cenário analisado.

Chandel e*t al.* [38], em 2016, detalharam os mecanismos para adulteração de medidores. A violação do medidor causa aumento na carga imprevisível no sistema de distribuição, superaquecimento de transformadores, e redução na geração de receita da concessionária. Os métodos de violação descritos são classificados em: violação do circuito de tensão, adulteração do circuito de corrente, influência de sinais externos e manipulação de dados de memória. O trabalho apresenta alguns exemplos de violações: curto circuito do transformador de corrente, injeção de sinal DC no neutro do medidor, aplicação de campo magnético, etc.. Por conseguinte, os autores sugerem a substituição dos equipamentos de medição eletromecânicos por medidores inteligentes, mais eficientes no controle a PNT. Ressaltam que o conhecimento sobre os tipos de adulterações contribui com as operações das equipes em campo.

Mais tarde em 2019, Salman *et al.* [10], reforçaram os benefícios da leitura automatizada, com a instalação de medidores inteligentes. Destacaram que a leitura

automatizada fornece informações contínuas de carga e consumo, evita prejuízos no faturamento provocados por erros de leitura e identifica desvios de energia. Enfatizaram os baixos custos na operação de leitura e faturamento desta tecnologia, em contrapartida ao grande investimento de implantação. Descreveram como a atualização dos perfis de energia e tendência de consumo contribuem com a forma mais eficiente e dinâmica de distribuir energia, equalizando oferta e demanda.

Hammerschmitt *et al.* [1], em 2020, apresentaram como é realizado o cálculo de perdas de energia para o setor elétrico brasileiro, com foco na distribuição, baseando-se no Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Relataram que as perdas são dimensionadas por meio de valores regulatórios obtidos por critérios de eficiência das concessionárias e, que os custos com as PNT são repassados aos consumidores pela tarifa de energia. Ainda categorizaram as técnicas para detecção e estimação de PNT em: orientadas por dados do consumidor, dirigidas por dados de rede de distribuição, e híbrida. Por fim, discorreram sobre a importância das informações coletadas por meio de medição inteligente para efetiva detecção de PNT.

3.2 MINERAÇÃO DE DADOS

Associado ao desenvolvimento dos mecanismos operacionais para o enfrentamento as PNT, surge a necessidade de otimização dos recursos técnicos e financeiros disponíveis. Neste sentido, amplia-se o interesse do ambiente técnico-científico na identificação de áreas com elevadas taxas de perda, pela caracterização de fatores de influência sobre as perdas, e apontamento de consumidores irregulares. A partir deste contexto, são apresentados a seguir trabalhos orientados para técnicas mineração de dados na detecção e caracterização de PNT.

Nizar *et al*. [26], em 2006, expuseram um método de detecção e classificação de PNT baseado na caracterização de perfis de carga dos consumidores. As caracterizações propostas seguem padrões diários, que podem variar de acordo com horários, dia da semana, ou mesmo, períodos de férias. O processo foi divido em duas etapas: determinação do perfil e caracterização do consumidor. Para detecção dos desvios no diagrama de cargas, foram utilizadas técnicas, como transformada wavelet, transformada rápida de Fourier e máquina de vetores de suporte. Neste estudo os perfis de cargas

representativos típico e atípico foram identificados para cada classe de cliente. Os padrões atípicos, normalmente insignificantes para a pesquisa, apresentaram neste caso, relevância para detecção precoce das PNT.

Em seguida, Nizar *et al*. [44] divulgaram um método que compara a eficiência da análise de padrões de comportamento de consumo organizado em média anual, mensal, semanal e diária. O método é baseado em dois algoritmos de classificação: Naive Bayes e árvore de decisão. Ambas as técnicas foram usadas e comparadas, com o objetivo de constatar qual tipo de perfil é mais representativos na detecção de PNT. Em geral, descobriram que o algoritmo de classificação por árvore de decisão é mais preciso, em especial para dados com base em dias e meses. No entanto, a classificação por árvore de decisão tem processamento mais lento, comparado ao Naive Bayes. Para o algoritmo bayesiano, o melhor desempenho é para perfil médio mensal.

Mais tarde, em 2009, Nizar *et al*. [3], compararam a eficácia dos métodos para previsão de demanda de carga utilizadas na identificação de consumidores fraudulentos. Nesta pesquisa foram comparadas as técnicas máquina de vetores de suporte e redes neurais artificias por meio de *Extreme Learning Machine,* e algumas de suas variações. O objetivo foi prever e identificar padrões de consumo que indiquem perdas. Dentre as ferramentas apresentadas a variação *Online Sequential Extreme Learning Machine* mostrou melhor exatidão nas classificações a partir de dados históricos.

Em 2010, Nagi *et al*. [4], desenvolveram uma estrutura para detecção de PNT por meio de identificação de padrões de consumo de carga anormais e fraudulentos. Medidores com leitura remota foram instalados em grandes consumidores de energia, para transmitirem dados de consumo, incluindo eventos diversos, tais como: queda de tensão, corrente reversa, sequência zero, dentre outros. Os dados eram registrados e enviados a uma central de monitoramento a cada 30 minutos. O sistema proposto utiliza máquina de vetores de suporte e interferência *fuzzy* para detectar comportamento de consumo anormal na base de dados geradas mensalmente. Resultados do teste indicam uma taxa de detecção de 55%. A metodologia proposta aumenta a eficácia da operação e reduz os custos operacionais no combate a PNT.

Também baseado na análise das características de consumo, Leon *et al.* [98], apresentaram uma metodologia para detecção de perdas. Neste caso, a técnica utiliza dois estimadores estatísticos, variabilidade e análise de tendência, para oferecer um modelo preditivo. A análise de variabilidade identifica os clientes com alta variação de consumo mensal em relação a outros clientes com características semelhantes. A análise de

tendência de consumo de um cliente depende da perspectiva de consumo de outros clientes com perfis semelhantes. A variabilidade associada a análise de tendência cria um modelo de classes de clientes com base nos atributos mais relevantes previamente selecionados. Para complementar o processo, o método de classificação árvore binária é utilizado com dois objetivos: atribuir novos clientes às classes existentes e identificar clientes de uma classe com alta taxa de PNT. A taxa de assertividade na identificação de clientes com fraude evoluiu de 20% para 80% com aplicação desta técnica.

Em 2014, Ramos *et al.* [99] elaboraram algoritmos híbridos baseados em técnicas evolutivas com o propósito de selecionar as características mais representativas para PNT. Foram comparados vários classificadores com destaque para a técnica floresta de caminhos ótimos, que por sua robustez foi escolhida para o cálculo da função objetivo das técnicas evolutivas. Os resultados demonstraram que as seleções de características podem melhorar a taxa de acerto da classificação de possíveis PNT para perfis de consumidores industriais e comerciais. Através da metodologia é possível caracterizar e identificar os perfis de consumidores com mais exatidão, afim de minimizar os custos gerados pelas PNT.

Em seguida, Quintero *et al.* [27], desenvolveram um *software* baseado em técnicas de mineração de dados para caracterizar comportamento de consumo anormal, utilizando perfis de cargas de clientes residenciais. Este sistema está fundamentado em análise de variáveis descritivas para apontamentos preditivos da condição de fraude, empregando diversas técnicas em sua modelagem, tais como: valor singular, amostragem sintética de minoria (SMOTE), análise *bi-cluster*, k-significância, árvore de decisão, máquina de vetor de suporte, e método supervisionado por vizinho mais próximo. Também, reforçam a importância da estruturação do problema para o fortalecimento da capacidade analítica de tomada de decisão. Em síntese, com a solução proposta, as empresas podem atingir 35% de efetividade na identificação de consumidores fraudulentos.

Em 2017, Pulz *et al.* [100], apresentaram um método para identificação de clientes com fraude comparando informações de medidores inteligentes com a energia faturada por circuito, associado a indicadores socioeconômicos. Apontaram como elementos relevantes ao estudo, informações como: número de pessoas por domicílio, taxa de pessoas com renda por domicílio, e características estruturais das residências. Sendo assim, propuseram um modelo de classificação usando máquina de vetores suporte treinado pelo histórico de inspeções de uma concessionária de energia para identificar possíveis clientes fraudadores em cada área analisada.

No mesmo ano, Madrigal *et al.* [15] discorreram sobre uma metodologia que estima o número de furtos e fraudes e suas respectivas taxas através da análise por regressão linear múltipla de variáveis. Os fatores avaliados foram: tipo de rede, quantitativo de medidores danificados, nível sócio econômico, casa sem energia, dentre outros. Por meio da técnica, encontraram modelos matemáticos que descrevem o comportamento do furto e da fraude face a determinados fatores, permitindo estimar os setores com maior probabilidade para anomalias. Por outro lado, estes modelos, identificaram variáveis que mais influenciam as PNT, o que permite estabelecer estratégias para mitigação do problema correlacionando características a cada tipo de fraude.

3.3 MÉTODOS MULTICRITÉRIO

Mantendo o propósito de apresentar os trabalhos disponíveis na literatura que contribuem para o processo de avaliação das ações de combate a perdas, são apontados a seguir, estudos que auxiliam o processo de tomada de decisão dos agentes do setor elétrico, com base na estruturação do problema, em conjunto com a sistematização da informação, e a elicitação de preferências para o cenário analisado.

Keeney [59], em 1996, apresentaram a abordagem *Value-Focused Thinking* (VFT) com o objetivo de identificar oportunidades de decisões desejáveis e criar alternativas por meio da estruturação de objetivos, permitindo ao decisor maior controle sobre a situação que se enfrenta. Dentro do contexto, Keeney descreve a aplicação do método, utilizado para listar e priorizar os objetivos estratégicos da companhia hidroelétrica *British Columbia Hydro and Power*.

Mais tarde, em 2007, Mota *et al.* [101] desenvolveram um novo método de superação multicritério, chamado ELECTRE IV-H, com o propósito de solucionar um problema de priorização de atividades em projetos, com base em aspectos críticos. A técnica proposta mostrou-se eficiente na solução de problemas com informações parciais, para os quais os decisores não podem estabelecer importância relativa entre os critérios. Destacaram que a metodologia é aplicada em lógica não compensatória para abordagem de sobreclassificação.

Morais *et al.* [102], em 2010, apresentaram um modelo multicritério, PROMETHE I, com a finalidade de priorizar regiões que necessitam de intervenções para

reduzir perdas no serviço de distribuição de água. Neste sentido a aplicação da técnica permitiu que as pessoas à frente do processo de tomada de decisão melhorassem a alocação de recursos, além de ampliar a eficiência no controle operacional do sistema, reduzindo a perdas no abastecimento.

Em 2018, Kaszowska *et al.* [103] utilizaram o método de avaliação por multicritério para identificar as características da rede de distribuição de uma região na Polônia que induzam redução de perdas e custos de manutenção de rede. A técnica avalia perdas para diferentes regiões geográficas e identifica áreas com perdas excessivas de acordo com o tipo de rede. Na aplicação da metodologia foi realizado um diagnóstico, em que as variáveis oferecem uma descrição abrangente da condição técnica da rede. Com o objetivo de realizar uma avaliação objetiva, foi aplicado um modelo de soma ponderada que permitiu classificar as variáveis em três categorias: estimulantes, desestimulantes e dominantes. A aplicação do modelo possibilitou a identificação de características que influenciam o comportamento das perdas.

Também em 2018, Kang *et al*. [92] avaliaram quais tecnologias de geração de energia devem compor a matriz energética brasileira, levando em consideração diversos fatores relacionados a aspectos sociais, econômicos e ambientais. Neste estudo foi proposto um modelo de decisão multicritério baseado no método FITradeoff, com o objetivo de auxiliar as decisões de planejamento energético, para o qual as informações disponíveis sobre cada tecnologia estavam incompletas. Foram avaliadas oito diferentes tecnologias de energia elétrica que compõem a matriz atual, em quatro critérios: financeiro, técnico, ambiental e socioeconômico. Para garantir a robustez dos resultados foi realizada uma análise de sensibilidade. A aplicação do modelo proposto forneceu informações importantes que podem ser utilizadas no Brasil na elaboração de políticas energéticas.

Em seguida, Macedo *et al*. [104] propuseram um modelo multicritério baseado no procedimento FITradeoff para apoiar decisões acerca de um problema de substituição de motor elétrico na indústria, a fim de construir um plano de reposição que atenda aos padrões mínimos de desempenho energético estabelecidos pela Lei de Eficiência Energética Brasileira. Também observaram o impacto da medida, já que no Brasil as indústrias consomem aproximadamente 40% de toda a energia disponível. O modelo proposto contribuiu para o processo de decisão, obtendo um resultado robusto a partir de informações parciais. Consequentemente, colaborou com a construção de um plano de substituição dos motores.

Posteriormente, em 2020, Fossile *et al.* [105], utilizaram um modelo de decisão multicritério para resolver um problema de seleção, com o propósito de identificar qual o tipo de energia renovável é a mais viável para se implementar em portos brasileiros. Foram avaliadas a energia eólica, a fotovoltaica e a energia das ondas, frente a vinte critérios definidos. Os critérios foram avaliados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) em uma escala Likert de cinco pontos. Na solução do problema foi aplicado o método de compensação flexível e interativo FITradeoff, que permitiu implementar um modelo de programação linear capaz de identificar alternativas potencialmente ótimas. As avaliações aqui realizadas mostraram que a energia fotovoltaica é a fonte de energia renovável mais viável para os portos brasileiros investirem.

3.4 SÍNTESE BIBLIOGRÁFICA

Com a análise das relevantes pesquisas desenvolvidas, acerca do monitoramento, prevenção e combate a PNT, foi possível perceber a lacuna relacionada a modelos de decisão que suportem a avaliação de alternativas de ações para combate à PNT, atendendo as preferências dos agentes decisores do setor elétrico. Ressalta-se ainda que a maioria dos trabalhos estão concentrados em descrever os tipos de intervenções e apresentar as técnicas de mineração de dados utilizadas na identificação de consumidores irregulares. Apesar de identificar destacados trabalhos envolvendo métodos multicritérios e a área de energia, nenhum deles tem o mesmo propósito da pesquisa. Isso deve-se, particularmente a dois motivos: a dificuldade na obtenção de informações sobre medidas aplicadas pelas concessionárias na prevenção e combate a PNT, e a carência de estudos sobre a anatomia de PNT em regiões com altas taxas de irregularidades.

Com base nos modelos multicritérios apresentados na literatura, foi possível inferir que as medidas aplicadas na prevenção e combate a perdas podem ser avaliadas em uma perspectiva de múltiplos critérios, e serem ordenadas de acordo com sua relevância. Assim sendo, propõe-se, o desenvolvimento de um modelo, baseado no método de decisão multicritério, que seja capaz de suprir esta necessidade, a partir de informações parciais disponíveis neste tipo de problema. Neste sentido, pretende-se primeiramente contextualizar o cenário de perdas a ser analisado, para em seguida elicitar de forma estruturada os objetivos dos decisores através do VFT, para enfim desenvolver

um modelo baseado no método de apoio a decisão FITradeoff dedicado a problemática da ordenação.

Concluída a análise bibliográfica especializada, elaborou-se o Quadro 2, no qual apresentam-se de formas sintética os trabalhos mais significativos no contexto do presente trabalho.

Quadro 2 – Síntese bibliográfica.

Ano	Pesquisadores	Técnica/Método	Contribuições	Tipo da Pesquisa		
				MO^{α}	MD^{β}	$MCDA^{\gamma}$
1996	Kenney	Value-Focused Thinking (VFT)	Utilizou a abordagem VFT, para listar objetivos estratégicos de uma companhia hidroelétrica.			●
2006	Alves *et al.*	Blindagem de rede e Substituição de medidores	Revelaram que a medida de blindagem associada a substituição de medidores eletromecânicos por eletrônicos, promoveram uma redução de 40 a 60% das PNT.	●		
2006	Gonzalez *et al.*	Medição fiscal totalizadora Parafusos especiais	Apresentaram os benefícios da medição totalizadora para detecção e controle de fraudes.	●		
2006	Nizar *et al.*	Transformada wavelet Transformada rápida de Fourier; Máquina de vetores de suporte	Classificaram através de padrões de consumo diários, perfis de cargas típicos e atípicos.		●	
2007	Nizar *et al.*	Naive Bayes Árvore de decisão	Compararam padrões de comportamento de consumo de energia organizado em média anual, mensal, semanal e diária.		●	
2007	Mota *et al.*	ELECTRE IV-H	Desenvolveram um novo método de superação multicritério (ELECTRE IV-H), com o propósito de solucionar um problema de priorização de atividades em projetos.			●
2009	Peralta *et al.*	Medidores Inteligentes	Exploraram as contribuições da medição inteligente na promoção de dados para o cálculo de PT e PNT.	●		
2009	Nizar *et al.*	Máquina de vetores de suporte Rede neural artificial	Comparam a eficácia dos métodos para previsão de demanda de carga utilizadas na identificação de consumidores fraudulentos.		●	
2010	Depuru *et al.*	Medição fiscal totalizadora Medidores inteligente Tarifa social, inspeções.	Discorreram sobre os métodos de roubo de eletricidade, em especial a fraude em medidores. Apresentam ações e políticas para mitigação das perdas.	●		
2010	Nagi *et al.*	Máquina de vetor de suporte Interferência Fuzzy	Desenvolveram uma estrutura de detecção de consumo de carga anormal, com a utilização de leitura remota em consumidores industriais.		●	
2010	Morais *et al.*	PROMETHE I	Apresentaram um modelo multicritério (PROMETHE I), com a finalidade de priorizar regiões que necessitam de intervenções, auxiliando os decisores na alocação de recurso para redução perdas no abastecimento.			●
2011	Leon *et al.*	Estimadores estatísticos (Análise de tendência)	Utilizaram estimadores estatísticos para identificar classes de clientes com alta taxa de PNT.		●	

MO^{α} – Medidas Operacionais.
MD^{β} – Mineração de Dados.
$MCDA^{\gamma}$ – Métodos Multicritério de Apoio à Decisão

Fonte: autoria própria.

Quadro 3 – Síntese bibliográfica (continuação).

Ano	Pesquisadores	Técnica/Método	Contribuições	Tipo da Pesquisa		
				MO^{α}	MD^{β}	$MCDA^{\gamma}$
2012	Agüero	Rede de distribuição inteligente	Apresentaram as vantagens das redes inteligentes para contenção das PNT, além de relatarem medidas para redução de PT.	●		
2014	Penner *et al.*	Medição fiscal totalizadora em circuitos	Retrataram o processo de coleta de informação para cálculo de perdas em circuitos de distribuição com o uso da medição fiscal.	●		
2014	Ramos *et al.*	Técnicas evolutivas (Floresta de Caminhos Ótimos)	Elaboraram um algoritmo identificar características comuns entre os perfis de consumidores fraudadores comerciais e industriais.		●	
2015	Gawlak	Investimentos em infraestrutura	O trabalho relaciona o investimento em infraestrutura de rede com a redução de PNT.	●		
2015	Quintero *et al.*	Valor singular; SMOTE; Bi-cluster K-significância Árvore de decisão Máquina de vetores de suporte.	Desenvolveram um software para identificar perfis de consumo anormal para clientes residenciais.		●	
2016	Chandel et al.	Medidores Inteligentes	Detalharam os mecanismos de adulteração de medidores. Sugerem a instalação de medidores como medida de controle de perdas.	●		
2017	Pulz *et al.*	Máquina de vetores de suporte	Associaram indicadores socioeconômicos a perfis de clientes fraudadores.		●	
2017	Madrigal *et al.*	Regressão linear múltiplas variáveis	Estimaram o número de furto e fraude e suas respectivas taxas por meio de regressão linear múltipla.		●	
2018	Kaszowska *et al.*	Método de agregação aditivo	Utilizaram o método de avaliação por multicritério, para identificar características da rede de distribuição que induzam redução de perdas.			●
2018	Kang *et al.*	FITradeoff	Avaliaram tecnologias de geração de energia para composição da matriz energética de um país, levando em consideração aspectos sociais, econômicos e ambientais.			●
2018	Macedo *et al.*	FITradeoff	Propuseram um modelo multicritério baseado no método FITradeoff para apoiar decisões acerca de um problema de eficiência energética na indústria.			●
2019	Salman *et al.*	Medidores Inteligentes	Destacam os benefícios da leitura automatizada para redução das perdas comercias geradas por erros de leitura manual e faturamento.	●		
2020	Hammerschmitt *et al.*	Medidores Inteligentes	Apresentam a metodologia de cálculo de perdas. Enfatizam a importância das informações coletadas por meio de medidores inteligentes para efetiva detecção de PNT.	●		
2020	Fossile *et al.*	FITradeoff	Utilizaram um modelo de decisão multicritério para solucionar um problema de seleção, com o objetivo de identificar o tipo de energia renovável é adequada para atender os portos brasileiros.			●

MO^{α} – Medidas Operacionais.
MD^{β} – Mineração de Dados.
$MCDA^{\gamma}$ – Métodos Multicritério de Apoio à Decisão

Fonte: autoria própria.

4 PROPOSIÇÃO DO MODELO

Esta pesquisa propõe a seguir, o desenvolvimento de um modelo de avaliação inaudito, como ferramenta de auxílio a decisão que assegure o atendimento das preferências do decisor. Neste sentido, a proposta é identificar as medidas de prevenção e combate as PNT que trazem os melhores resultados, e assim orientar as ações mais críticas para redução dos custos operacionais e o tempo de reposta.

Atualmente, as empresas limitam-se a avaliar o desempenho das medidas através do cálculo médio da energia agregada (recuperada) e/ou número de irregularidades identificadas, normalmente analisados em separado. O foco na análise em um único critério coloca à margem aspectos importantes que influenciam diretamente na operação, entre eles: custo, segurança e longevidade das ações.

Dadas as limitações financeiras e operacionais que caracterizam empresas do setor, superar a indecisão sobre qual tipo de intervenção deve ser aplicada prioritariamente no empenho pelos melhores resultados é um grande desafio.

Sendo assim, é fundamental que o gestor da área de prevenção e combate a perdas tenha a capacidade de avaliar os cenários de perdas na distribuição de energia, bem como reconhecer os efeitos das ações aplicadas, para de fato priorizar a indicação das intervenções em cada região, garantindo que sejam atendidos os indicadores pré-estabelecidos pela agência reguladora.

Observa-se, no entanto, que este tipo estudo é complexo, e para uma efetiva solução, deve-se envolver o detalhamento e a análise em conjunto de outros aspectos que vão além da energia recuperada e o número de irregularidades.

Deste modo, o modelo de avaliação deve envolver um conceito multidimensional que não pode ser capturado por um único indicador, o que implica na característica

multiobjetivo do problema. Dada esta estrutura, uma abordagem multicritério é frequentemente utilizada para lidar com este tipo de problema.

O desenvolvimento de um modelo de decisão multicritério para suporte a situação prática apresentada, passa pela a escolha do método mais apropriado, em função de suas características fundamentais.

Dessa forma, neste capítulo será descrito todo o desenvolvimento do modelo proposto para avaliação das medidas de prevenção e combate as PNT, a partir dos motivos que apontaram a indicação do método FITradeoff para a problemática de ordenação, como técnica para solução do problema. Além da justificativa do método utilizado, serão abordadas as etapas de composição do modelo, incluindo processos relacionados à estruturação, parametrização e validação de componentes, como: definição de objetivos, consolidação dos critérios de avaliação, e definição de escalas.

4.1 JUSTIFICATIVA DO MÉTODO

No processo de tomada de decisão multicritério a definição do método a ser aplicado depende de um conjunto de fatores, dentre os quais se destacam o tipo de problemática e a estrutura de preferência do decisor [25]. Assim, no sentido de atender o propósito de avaliação das medidas de prevenção e combate as PNT, colocando em ordem as intervenções a serem aplicadas nos circuitos de distribuição, pode-se concluir que a situação deve estar associada a problemática de ordenação ($P.\gamma$), para alcançar o tipo de resposta desejada.

Adicionalmente, foi identificado que a estrutura de preferência do decisor está baseada em relações compensatórias, nas quais um desempenho ruim de uma alternativa em um determinado critério pode ser compensando por bom desempenho de outro critério, fazendo com que existam *tradeoffs* entre os desempenhos dos critérios [25]. Complementarmente, foram verificadas as propriedades básicas de preferência, sendo notadas relações de preferência estrita P e indiferença I, formando uma estrutura (P, I), o que atende a propriedade da ordenabilidade [25]. Por fim, foi observado que o decisor não consegue definir o limite da indiferença entre os critérios pré-estabelecidos, fazendo com que o problema seja caracterizado por informações incompletas. É importante destacar que nos casos de aplicações reais, é comum que o decisor disponha apenas de informações parciais para solução de problemas de decisão.

Em síntese, a racionalidade compensatória e a estrutura de preferências (P, I) com consequências determinísticas, indicam uma abordagem em critério único de síntese, baseado na função valor MAVT [65]. Observado que o problema conta com informações incompletas, percebe-se que o método FITradeoff [80] é visto como uma ferramenta adequada ao problema.

Em 2019, Frej *et al.* [79], utilizou o método FITradeoff na seleção de fornecedores para a indústria alimentícia, a partir da ordenação das alternativas.

Assim, a aplicação do método FITradeoff à problemática de ordenação [79], foi proposto baseando-se na natureza do problema e na estrutura de preferência do decisor. A escolha do método FITradeoff também se justifica pelas vantagens do procedimento interativo e flexível, que permite o modelo recomendar uma ordenação a partir de informações parciais, reduzindo o esforço cognitivo, sem desfazer a forte estrutura axiomática do procedimento *Tradeoff* tradicional, ao associar dois paradigmas básicos: a avaliação holística [63] e a elicitação por decomposição [72].

Além do mais, a aplicação do modelo através da interação com o SAD FITradeoff [106], concede clareza e simplicidade na implementação da solução do problema. Por sua vez, a flexibilidade proporciona ao decisor, a possibilidade de substituir a comparação entre pares de desempenho dos critérios, pela avaliação holística das alternativas, sem prejuízo à solução. O procedimento flexível também permite que o decisor interrompa o processo ao considerar que a recomendação fornecida pelo SAD seja satisfatória, sem a necessidade de realizar as demais iterações.

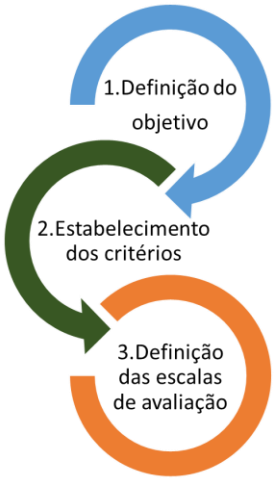
4.2 O MODELO PROPOSTO

A parametrização do modelo de avaliação das medidas de prevenção e combate as PNT aplicadas pelas concessionárias distribuidoras de energia, para ordenação em relevância das intervenções, e auxilio no direcionamento de estratégias para redução das perdas, foi baseado no procedimento de estruturação e análise de problema de multicritério proposto em [25].

O modelo de avaliação proposto nessa pesquisa foi elaborado a partir de três etapas de desenvolvimento: a definição dos objetivos do decisor, a identificação da família de critérios utilizados na tomada de decisão, e a definição das escalas de avaliação. Nesta fase, cada objetivo fundamental será mensurado por meio de um critério ou

atributo. Estes critérios irão compor a matriz de avaliação das alternativas na fase de aplicação. Na Figura 5, está representado um fluxograma com a síntese das etapas de desenvolvimento do modelo de avaliação (MA).

Figura 5 - Etapas de desenvolvimento do modelo de avaliação.



Fonte: autoria própria.

Para definição e estruturação dos objetivos, foi utilizado o método *Value Focused Thinking* (VFT) [55]. Na etapa de identificação da família de critérios, para cada objetivo estabelecido, foi construído um critério ou atributo que o represente no processo de modelagem quantitativa (escala), de tal forma que atendam a exaustividade, a consistência e a não redundância.

Em congruência com o procedimento descrito em [25], e atendendo ao aperfeiçoamento contínuo, robustez e confiabilidade, poderá haver regresso a etapas anteriores durante o processo de desenvolvimento.

A seguir será apresentada o detalhamento das etapas de parametrização.

4.2.1 Definição de Objetivos

A pesquisa propõe a aplicação do *Value Focused Thinking* (VFT), método para estruturação de problemas focado no pensamento de valor, para definição dos critérios de avaliação. O VFT foi aplicado através de uma entrevista estruturada com o decisor, com propósito de extrair os objetivos, para em consequência, definir os critérios. A execução do VFT nesta pesquisa é baseada em uma adaptação do procedimento proposto em [57].

Na primeira etapa, foram identificados os valores do decisor através de um questionário semiestruturado (disponibilizado no Apêndice A deste documento), baseado nas técnicas de identificação de objetivos e valores proposta por [55].

Neste sentido, com referência ao retratado na revisão da literatura, foi apresentado ao decisor o método VFT, que busca primeiro decidir o que se deseja para então descobrir como alcançá-lo [55]. Também foi reafirmada a sua capacidade de direcionar um recurso crítico para condução das melhores decisões [57].

Antes de apresentar os questionamentos, foi validado com o decisor o contexto do problema. Seguidamente, foi aplicado o questionário, formado por questões que buscam primeiramente identificar os desejos, para adiante verificar as limitações, e selecionar os mecanismos de conquista, para enfim identificar parâmetros que os possam mensurar. Adicionalmente, o método permite identificar possíveis alternativas candidatas a solução do problema.

A partir dos resultados provenientes deste questionário foi possível apontar uma lista de potenciais objetivos. Eles foram verificados quanto à redundância e classificados em dois grupos, objetivos fundamentais e meio, com o apoio do tomador de decisão. Foram tratados como fundamentais os objetivos fins, ou seja, aqueles identificados como consequência dos objetivos meios [59]. No Quadro 3, estão apresentados os objetivos fundamentais identificados, necessários ao alcance dos objetivos estratégicos: otimização do desempeno econômico e maximização do impacto técnico operacional.

Quadro 4 – Hierarquia de objetivos.

1. Otimizar o desempenho econômico
1.1. Maximizar a recuperação de energia 1.2. Minimizar os custos das ações de prevenção e combate às PNT 1.3. Aumentar o quantitativo de unidades consumidoras regularizadas
2. Maximizar o impacto técnico operacional
2.1. Minimizar o tempo de regularização das unidades consumidoras 2.2. Minimizar os ricos de acidentes na aplicação da medida 2.3. Potencializar o grau de proteção contra fraude e furto de energia efetiva das ações

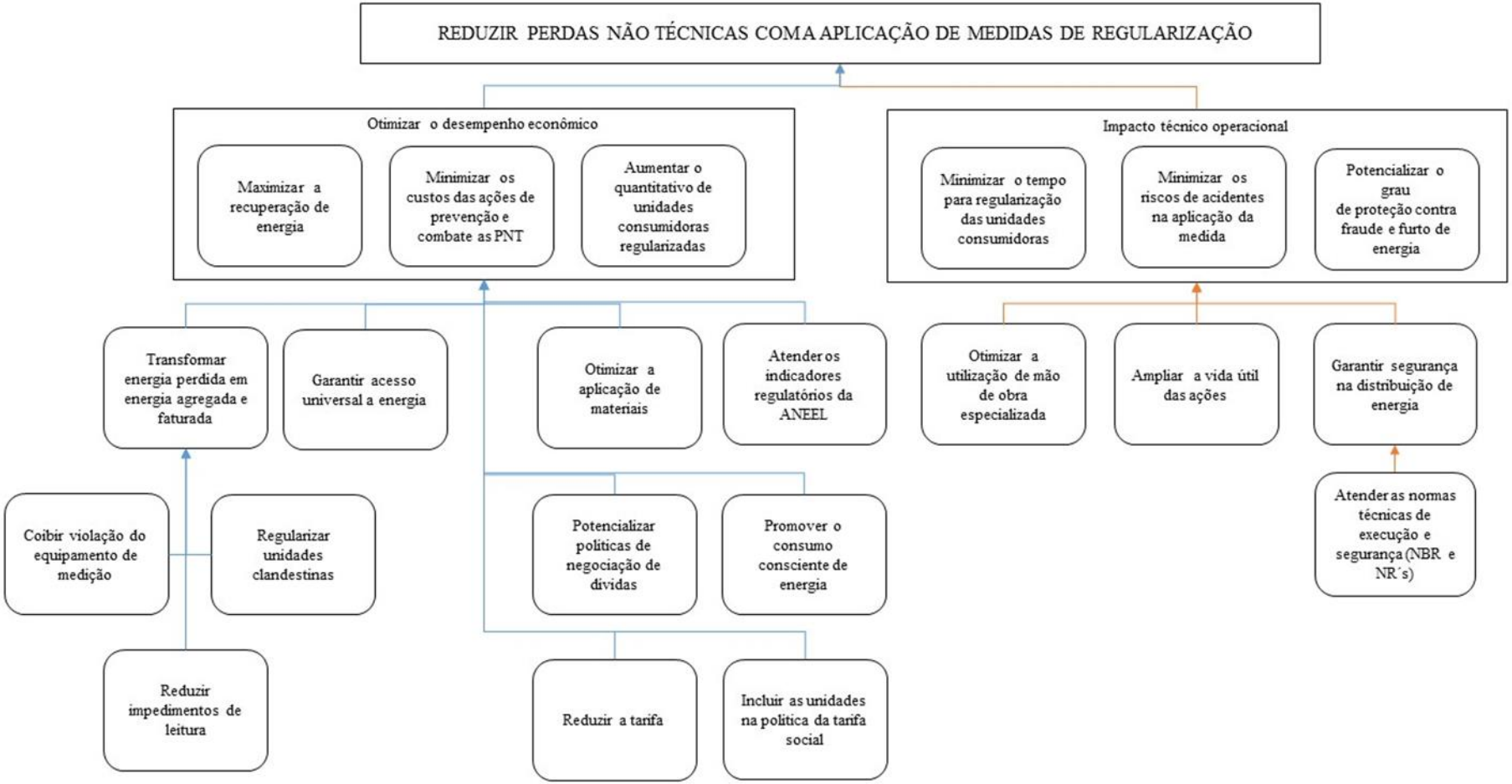
Fonte: autoria própria.

Em complemento ao processo, é realizada uma estruturação dos objetivos, buscando compreender as relações existentes entre eles no processo decisório. Uma vez que estabelecidos os objetivos fundamentais, o decisor participou de uma discussão para avaliar quais aspectos são valorizados, tendo em vista a contribuição das ações de

prevenção e combate a perdas para a redução das PNT em circuitos de distribuição de energia elétrica. Nesta etapa, os valores do decisor foram identificados e estruturados. É importante destacar que o decisor manteve-se confortável durante todo o processo.

A rede de objetivo meio-fim conclusão desta etapa do desenvolvimento do modelo pode ser observada na Figura 6.

Figura 6 - Rede de objetivos meio-fim.



Fonte: autoria própria.

4.2.2 ESTABELECIMENTO DOS CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO

Nesta etapa de parametrização do modelo é realizada a identificação da família de critérios que melhor representa os objetivos. Dentro do contexto, foram analisados alguns trabalhos relacionados apresentados na literatura, seguidos por consultas a especialista, com o propósito de obter conhecimento sobre as ferramentas de análise de desempenho mais utilizadas pelas distribuidoras.

Assim, para atender o objetivo de otimização do desempenho econômico é necessário analisar três propósitos: maximização da energia recuperada, minimização dos custos de aplicação e aumento do número de unidades regularizadas.

Conforme já apresentado, o cálculo das perdas pode ser expresso em quilowatt-hora (kWh) [28], de modo que a energia não perdida, ou seja, agregada (recuperada) com aplicação das medidas deve ser mensurada da mesma forma. Também, na revisão bibliográfica é discutido o impacto dos custos das intervenções [10], salientando a importância da apresentação de um critério que abarque o tema. Seguindo a lógica em [23], é evidenciada a relação entre o número de consumidores padronizados e redução das PNT, justificando a relevância da existência de um critério que quantifique as unidades consumidora que necessitam de padronização.

Do mesmo modo, a maximização do impacto técnico operacional das medidas avaliadas, passa pela minimização do tempo para regularização, pela minimização dos riscos à segurança da operação e pela potencialização do grau de proteção das intervenções. A minimização do tempo, naturalmente reflete na manutenção dos indicadores regulatórios [8]. Adicionalmente, foi apresentado em [2] a associação entre as conexões clandestinas e o comprometimento da segurança dos serviços de eletricidade, dos indivíduos e de suas propriedades, validando a necessidade de um critério que alcance o assunto. Por fim, observando que os investimentos em infraestrutura refletem positivamente na redução das perdas [6], a avaliação do grau de proteção das medidas de aplicação poderá se dar com identificação da estrutura (dos elementos de bloqueio) aplicada em cada medida.

Assim, para avaliação de desempenho das intervenções, foram identificados critérios que correspondem aos aspectos mais significativos. Logo, para cada objetivo fundamental, foi atribuído um critério capaz de medir o desempenho de cada alternativa quanto ao respectivo propósito, dentro do processo de modelagem quantitativa.

A proposição dos critérios contou com o apoio do decisor. A seguir, no Quadro 4 estão apresentados os critérios selecionados para cada objetivo.

Quadro 5 – Hierarquia dos objetivos fundamentais.

Objetivo	Tipo do Critério	Critério	
1.Otimizar o desempenho econômico			
1.1.Maximizar a recuperação de energia	Natural	Energia agregada	EA
1.2.Minimizar os custos das ações de prevenção e combate as PNT	Natural	Custo médio unitário	CM
1.3.Aumentar o quantitativo de unidades consumidoras regularizadas	Natural	Número de unidades para padronização	NP
2.Maximizar o impacto técnico operacional			
2.1.Minimizar o tempo para regularização das unidades consumidoras	Natural	Tempo médio do serviço	TM
2.2.Minimizar os riscos de acidentes na aplicação da medida	Construído	Grau de risco da atividade	GR
2.3.Potencializar o grau de proteção contra fraude e furto de energia	Construído	Grau de proteção da atividade	GP

Fonte: autoria própria.

Esta estrutura foi submetida à avaliação por parte de especialistas, que contribuíram nesta pesquisa para que melhorias pudessem ser incorporadas ao modelo a partir de uma análise crítica de profissionais experientes da área. É válido mencionar que a validação foi conduzida com viés técnico associado ao conhecimento decorrente da atuação profissional em distribuidoras de energia.

Ressalta-se ainda que a família de critérios estabelecida atende aos princípios de exaustividade e não redundância.

4.2.3 Definição das Escalas de Avaliação

A definição das escalas de avaliação dos critérios, com propósito de mensurar os desempenhos das alternativas na direção da conquista dos objetivos, decorre inicialmente da própria descrição dos critérios.

Sendo assim, a seguir estão apresentadas as descrições de cada um dos critérios selecionados, bem como, a escala definida para avaliação:

- Energia agregada (EA) – é uma medida de energia recuperada mediante aplicação de uma ação de prevenção e combate a perdas, dada pela média de quilowatt-hora por unidade consumidora (kWh/UC). Observa-se neste caso como mais preferível a medida que proporciona maior energia agregada por unidade.

- Custo médio unitário (CM) – representa o custo médio de implantação da alternativa, dado em valor monetário em reais, a partir do somatório dos custos dos serviços e materiais aplicados em cada intervenção. Neste caso, avalia-se como mais preferíveis as alternativas com menor valor.
- Número de unidades para padronização (NP) – este critério considera o número de unidades a serem padronizadas de acordo com cada alternativa, logo mensurado em unidades. Sendo preferível o maior número de padronizações.
- Tempo médio do serviço (TM) – com desempenho medido em horas, este critério avalia o tempo médio necessário para execução da atividade, considerando preferível a alternativa que empenha menos tempo.
- Grau de risco da atividade (GR) – foi construído com o objetivo de avaliar a atividade quanto à segurança operacional. As alternativas foram avaliadas quanto a severidade dos riscos, ocorrência e sua abrangência, apresentando resultados dentro de uma escada Likert de 3 posições, onde 1 significa baixo, 2 representa moderado e 3 remete a risco alto. É mais preferível o resultado com menor grau de risco.
- Grau de proteção da atividade (GP) – foi idealizado com propósito de medir o grau de eficiência das proteções, gerado mediante a aplicação da alternativa. Este critério classifica a medida a partir do número de elementos de bloqueio utilizados na proteção contra a fraude. Os resultados são apresentados em uma escala de Likert de 1 a 3 posições, onde 1 significa baixo (1 elemento), 2 representa moderado (2 elementos) e 3 remete ao maior grau de proteção (3 ou mais elementos). Os elementos avaliados foram: cabo concêntrico, conector Katro, caixa blindada, parafuso de segurança e tubete de corte. Considera-se mais favorável o maior grau de proteção.

A escala de Likert, proposta para obtenção dos desempenhos dos dois últimos critérios, é justificada pela maior facilidade que as pessoas possuem em expressarem opiniões em escalas simétricas [107].

Dessa foram, os primeiros quatro critérios apresentados (EA, CM, NP e TM) são contínuos e quantitativos, enquanto os dois últimos (GR e GP) são qualitativos e discretos. Conjuntamente são capazes de avaliar a criticidade das intervenções.

Em síntese, para cada objetivo estabelecido foi apresentada uma variável capaz de medir o seu desempenho. Destaca-se ainda que os critérios apresentados atenderam às propriedades de não redundância, exaustividade, consistência, além de serem facilmente mensuráveis e compreendidos.

5 APLICAÇÃO DO MODELO E RESULTADOS

Logo após a estruturação do modelo de avaliação, foi realizada a aplicação da ferramenta com o propósito de comprovar sua capacidade no suporte à problemática de ordenação das medidas de prevenção e combate à PNT. Contudo, antes desta, foi identificado o decisor para a situação problema, bem com as intervenções avaliadas.

A aplicação foi efetivada no contexto de avaliação das intervenções empregadas por uma concessionária distribuidora de energia, em 45 circuitos de distribuição de energia elétrica com 5.123 unidades consumidoras, numa área com altas taxas de PNT de uma capital na região nordeste do Brasil. A seleção dos circuitos examinados foi influenciada por fatores como: baixo poder aquisitivo e elevada taxa de analfabetismo da população, conforme apontado em [2].

Neste sentido, a formação da base de dados é uma etapa essencial para validação do modelo proposto. Para isto, foram realizadas observações em campo, a fim de coletar informações sobre irregularidades no consumo de energia (os dados coletados são apresentados no Anexo 1). Todas as observações realizadas e consolidadas no banco de dados passaram por um processo de verificação sistemática em busca de eventuais erros que pudessem indevidamente interferir no estudo.

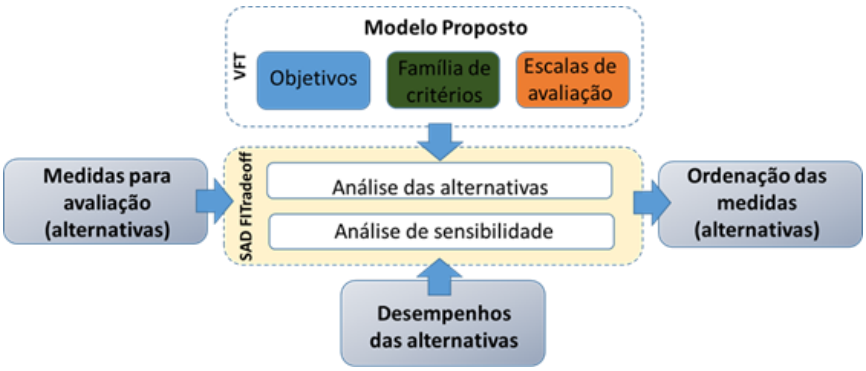
Observado o empenho para consolidação destes dados, é importante destacar que alternativamente estas informações podem ser facilmente apuradas pelas distribuidoras de energia, através de apontamentos durante o processo de leitura para faturação.

Na etapa inicial de aplicação do modelo foi realizada a avaliação intracritério, com o objetivo de reconhecer o desempenho (função valor) das alternativas frente a cada critério, provendo assim a matriz de consequência (avaliação) a ser carregada no SAD.

A execução do modelo ainda compreende o momento de interação do decisor com o SAD, quando se viabiliza a avaliação e ordenação das alternativas. Seguidamente foi executada uma análise de sensibilidade, para verificação da robustez do modelo. Por fim, foram discutidos os resultados da avaliação.

Na Figura 7, está representado um fluxograma com a síntese do processo de aplicação do modelo de avaliação (MA). As medidas de prevenção e combate a PNT a serem avaliadas, podem ser identificadas através de diagnóstico de campo realizado por profissionais especializados ou por equipe de leitura. O modelo desenvolvido com a aplicação do VFT fornecerá os parâmetros necessários à avaliação das alternativas, efetivadas pelo SAD durante interação com o decisor. Os desempenhos das alternativas para os critérios avaliados devem ser obtidos a partir de dados da própria distribuidora de energia, e complementados quando necessário, através de diagnóstico de campo e entrevistas a especialistas.

Figura 7 – Fluxograma de aplicação do modelo.



Fonte: autoria própria.

5.1 IDENTIFICAÇÃO DO DECISOR

O modelo de avaliação fruto deste trabalho está considerando um único tomador de decisão. Sob esta perspectiva o modelo poderá se ajustado ao processo com múltiplos decisores. Neste sentido, a partir de uma simples análise, foi possível identificar o decisor como responsável pelo gerenciamento e controle de aplicação das medidas de prevenção e combate as PNT da concessionária da região avaliada. Este decisor possui formação técnica em engenharia elétrica e conhecimento especialista sobre os processos internos da empresa distribuidora de energia elétrica necessários para a realização da elicitação.

5.2 MEDIDAS AVALIADAS

Em relação ao estabelecimento do espaço de ações, foram identificadas durante o diagnóstico dos circuitos avaliados (Anexo1), as medidas de prevenção e combate a PNT

comumente aplicadas pela concessionária distribuidora de energia responsável pela região em questão.

Durante o levantamento em campo, também foram reconhecidos seis diferentes tipos de ocorrências que contribuem com o aumento da taxa de PNT: acesso facilitado ao medidor, equipamento de medição interno sem acesso público, conexões de energia clandestinas, unidades desligadas devido a pendências financeiras, consumidores auto religados e medidores danificados [23].

Dessa forma, são avaliadas as seis diferentes intervenções, aplicadas pela concessionária na mitigação dos fatores apresentados. Assim, dentro da proposta da pesquisa, as ações detectadas representam alternativas a serem apreciadas de acordo com os critérios estabelecidos. A seguir são apresentadas a medidas avaliadas:

- Blindagem de unidade consumidora: consiste na substituição do padrão de medição da unidade consumidora, incluindo instalação de caixa de medição blindada em aço, parafuso de segurança para fechamento da caixa e ramal de entrada em cabo concêntrico conectado diretamente a medição (antes da proteção);
- Externalização do padrão de medição: corresponde a transferência do padrão de medição localizado internamente a unidade consumidora para um local de fácil leitura a partir de uma via pública;
- Regularização de unidades consumidoras clandestinas: compreende adequação do padrão de medição, e aplicação do contrato de fornecimento de energia;
- Religação de unidades consumidoras, a partir da renegociação de dívidas: refere-se ao ato de regularizar o fornecimento de energia após a quitação ou parcelamento das pendências financeiras;
- Suspensão do fornecimento de energia para clientes autoreligados: consiste em suspender a conexão irregular do cliente ligado com pendência financeira;
- Substituição de medidor: compreende substituir o medidor danificado, por um novo medidor, preferencialmente eletrônico.

É conhecido que cada tipo de intervenção atende uma determinada anomalia. Porém, a disponibilidade limitada de recursos financeiros e número insuficiente de profissionais capacitados, exigem a otimização dos instrumentos disponíveis. É neste sentido, que a ordenação das alternativas, a partir da avaliação da matriz de consequência,

facilita o gerenciamento da execução do plano de medidas de prevenção e combate a perdas.

Após a identificação das medidas avaliadas, segue a aplicação do modelo de avalição, através da interação com o SAD.

5.3 APLICAÇÃO DO MODELO DE AVALIAÇÃO

Nesta seção está detalhado a aplicação do modelo de avaliação, realizado através do SAD do FITradeoff[2] [106], de propriedade da Universidade Federal de Pernambuco, mediante solicitação de registro para uso. Esta etapa compreende além dos processos de avaliação intercritério e ordenação das alternativas, uma análise de sensibilidade do modelo.

Antes de iniciar o processo de interação do decisor com o SAD, o analista e pesquisador apresentou ao decisor o funcionamento do sistema, expondo-lhe os tipos de perguntas que seriam realizadas e como poderia fornecer suas repostas. Também, foi explicado o conceito de flexibilidade, que permite não responder perguntas, caso não se qualifique apto, e a possibilidade de finalizar o processo de avaliação ao identificar que o objetivo foi atingido. Por último foi esclarecido o conceito de avaliação holística.

Para início do processo, são necessárias algumas etapas relacionadas à especificação dos parâmetros de composição do modelo no *software*. Inicialmente, é preciso classificar o tipo do critério a ser trabalhado: contínuo de minimização, contínuo de maximização, discreto de minimização ou discreto de maximização.

Neste sentido, os critérios estabelecidos foram classificados em:

- CM e TM: contínuos de minimização, dado que os desempenhos destes critérios são apresentados em escalas contínuas, com a preferência pela minimização para atendimento ao objetivo;
- EA e NP: contínuos de maximização, observando que são indicados em escalas contínuas, sendo mais preferível o maior desempenho;
- GR: discreto de minimização, considerando que é representado por uma escala *Likert*, no sentido de que quando menor o desempenho melhor, e;
- GP: discreto de maximização, também estabelecido em escala *Likert*, porém tendo como mais preferível o maior valor. Os critérios GR e GP foram

[2] Disponível para aplicação na página da internet http://www.cdsid.org.br/fitradeoff/.

estabelecidos como discreto dada a escala de *Likert* utilizada na entrevista com os especialistas.

Logo após, foi carregada a matriz de consequência, composta pelos desempenhos das alternativas, a partir de: dados fornecidos pela distribuidora de energia, diagnóstico realizado em campo, e entrevistas estruturadas com especialistas, conforme apresentado no Quadro 5.

Quadro 6 – Fonte de dados para o desempenho dos critérios.

Critérios	Fonte
Energia agregada (EA) Custo médio unitário (CM) Tempo médio de serviço – TMS	Empresa distribuidora de energia
Número de unidades para padronização (NP)	Diagnóstico realizado em campo
Grau de risco da atividade (GR) Grau de proteção da atividade (GP)	Entrevista estrutura com especialistas

Fonte: autoria própria.

Na matriz de consequência (Tabela 2), pode-se observar, as informações de desempenho das alternativas (medidas) nos critérios do problema, baseada na avaliação intracritério.

Tabela 2 – Matriz de consequências

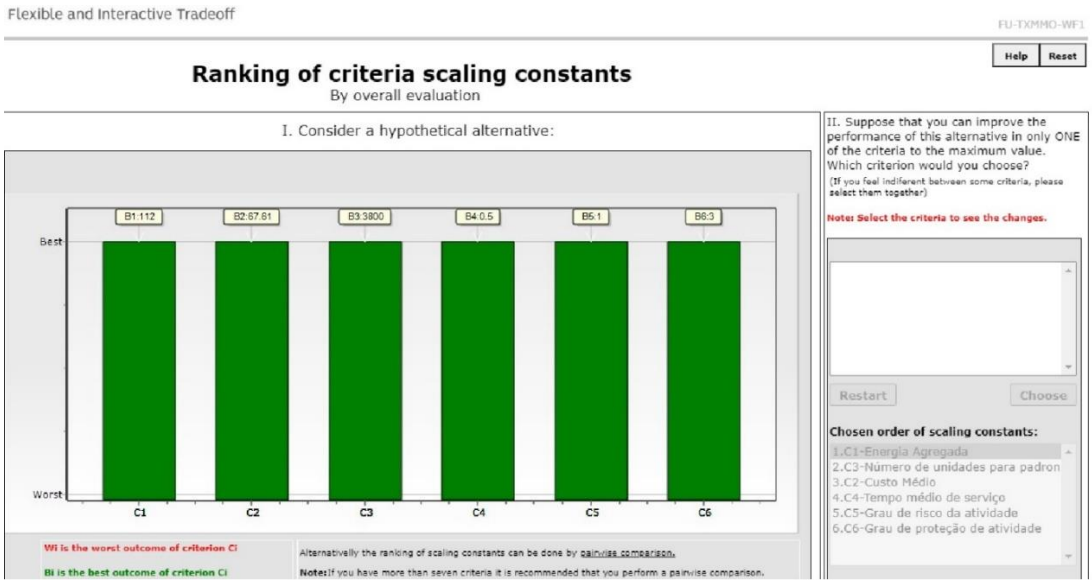
	Alternativas	Critérios					
		Energia agregada (kWh/UC)	Custo médio unitário	Número de unidades para padronização	Tempo médio de serviço - TMS	Grau de risco da atividade	Grau de proteção da atividade
1	Blindagem da unidade consumidora	111,19	R$ 799,64	3.800	1,33	3	3
2	Externalização do padrão de medição	49,00	R$ 1.621,92	316	1,33	3	3
3	Regularização de unidades consumidoras clandestinas	75,00	R$ 1.602,77	133	1,14	3	3
4	Religação de unidades consumidoras	112,00	R$ 300,76	365	1,00	2	2
5	Suspensão do fornecimento de energia de auto religados	0,00	R$ 67,61	228	0,67	3	1
6	Substituição de medidor	59,00	R$ 198,08	281	0,50	1	1

Fonte: autoria própria.

Em seguida, com os parâmetros carregados no SAD, foi iniciada a primeira etapa do método FITradeoff, quando o decisor é solicitado a ordenar as constantes de escala

dos critérios. Nesta etapa, o tomador de decisão optou pela avaliação holística, ao invés da comparação por pares, para classificar as constantes de escala dos critérios. Na Figura 8, pode-se observar a interface do SAD ao final da avaliação holística que definiu o ranking das constantes de escala.

Figura 8 - Avaliação holística do FITradeoff.



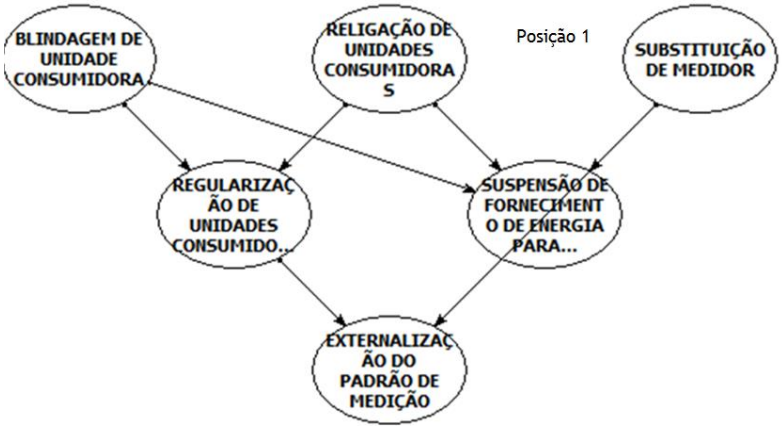
Fonte: autoria própria.

Através da avaliação holística, os critérios foram ordenados da seguinte forma: $k_{EA} > k_{NP} > k_{CM} > k_{TM} > k_{GR} > k_{GP}$. Desse modo, pode-se entender que a constante de escala do critério energia agregada (EA) é maior que a do critério custo médio (CM), e assim seguidamente até a menor constante de escala, grau de proteção da atividade (GP). Esta informação é utilizada como restrição do modelo do Problema de Programação Linear (PPL) do SAD, de forma que permite o modelo buscar relações de dominância entre as alternativas.

Com a ordenação das constantes de escala dos critérios, o SAD ofereceu informações parciais com todas as alternativas em uma única posição. Neste ciclo, observou-se incomparabilidade entre as alternativas blindagem, religação e substituição de medidor. As demais relações de preferência seguem identificadas no diagrama de Hasse representado na Figura 9, onde os círculos correspondem às alternativas, e setas direcionais indicam a relação de dominância definida na elicitação.

Após a avaliação holística, o processo continua analisando as preferências do decisor através da comparação de desempenho das alternativas, até que seja obtido a ordenação desejada.

Figura 9 - Diagrama de Hasse após ordenação das constantes de escalas

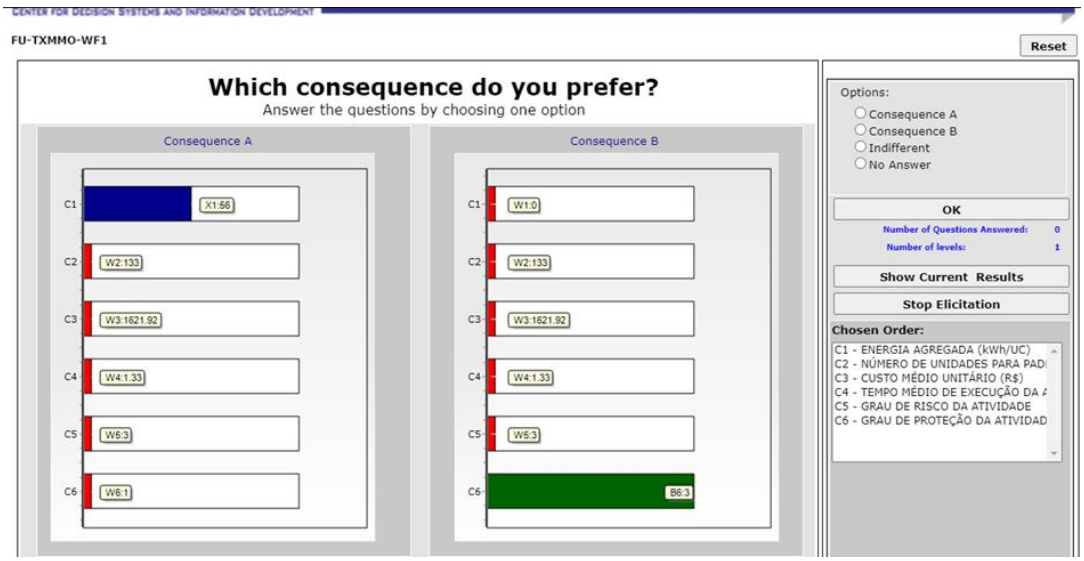


Fonte: autoria própria.

Assim, o decisor iniciou o procedimento de elicitação flexível, com objetivo de explorar o espaço de consequências do problema. Neste ponto, o decisor responde a questionamentos em relação a duas alternativas hipotéticas de decisão que possuem desempenhos distintos entre dois critérios, para qual ele pode declarar preferência estrita para uma das consequências, indiferença entre elas, ou mesmo não apto a responder. Em cada rodada, quando o decisor responde uma nova pergunta, o espaço de constantes de escala (pesos) é atualizado, o modelo PPL é executado de modo que as relações de dominância sejam verificadas, e a classificação das alternativas recalculada.

Como exemplo, no primeiro ciclo da etapa de elicitação flexível, representado na Figura 10, o decisor foi solicitado a escolher entre as consequências que representam a metade do desempenho da performance máxima do critério EA e a melhor performance do critério GP, com o objetivo de identificar um padrão de constante de escalas.

Figura 10 - Elicitação Flexível do FITradeoff.



Fonte: autoria própria.

Neste caso, o tomador de decisão indicou a preferência pela consequência A.

Conforme o decisor fornece mais informações de preferência durante o processo de elicitação, novas relações de dominâncias são encontradas pelo modelo PPL, de forma que a ordenação é refinada a cada ciclo.

Na Tabela 3 é possível visualizar as 24 iterações de elicitação flexível necessárias para ordenar a seis alternativas, de acordo com a preferência do decisor. Como pode-se observar a consequência A representa sempre um desempenho intermediário entre o melhor e o pior para cada critério *i* e a consequência B reflete o melhor desempenho para um critério diferente nas comparações.

Tabela 3 – Matriz de Avaliação.

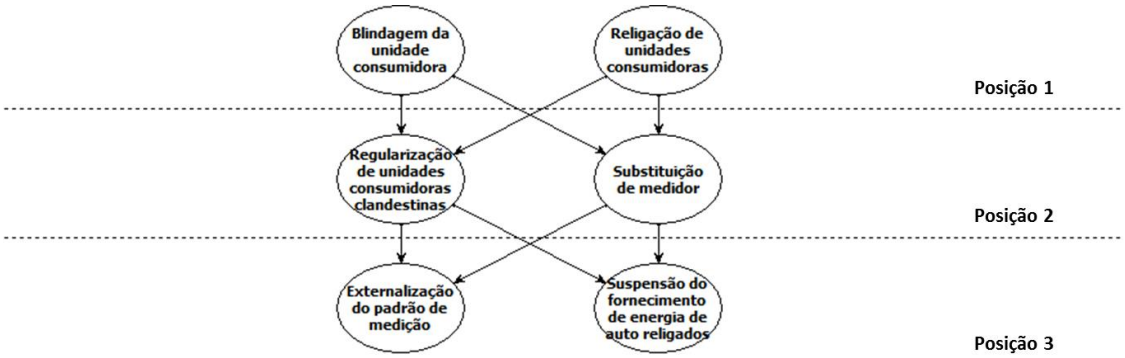
Ciclo	Consequência A	Consequência B	Resposta do decisor	Níveis de Classificação
1	56.000 de Energia agregada (kWh/UC)	Melhor do Grau de proteção da atividade (3)	A	1
2	56.000 de Energia agregada (kWh/UC)	Melhor do Número de padronizações (3800)	A	1
3	1966.500 de Número de unidades para padronização	Melhor do Custo médio unitário (R$) (67.61)	B	1
4	844.765 de Custo médio unitário (R$)	Melhor do tempo médio de execução (0.5)	A	3
5	0.915 de Tempo médio de execução da atividade	Melhor do grau de risco de atividade (1)	B	3
6	2.000 de Grau de risco da atividade	Melhor do Grau de proteção da atividade (3)	Indiferente	3
7	28.000 de Energia agregada (kWh/UC)	Melhor do Número de padronizações (3800)	A	4
8	2883.250 de Número de unidades para padronização	Melhor do Custo médio unitário (R$) (67.61)	A	4
9	1233.343 de Custo médio unitário (R$)	Melhor do tempo médio de execução (0.5)	B	4
10	0.708 de Tempo médio de execução da atividade	Melhor grau de risco da atividade (1)	A	4
11	14.000 de Energia agregada (kWh/UC)	Melhor do Número de padronizações (3800)	B	5
12	2424.875 de Número de unidades para padronização	Melhor do Custo médio unitário (R$) (67.61)	A	5
13	1039.054 de Custo médio unitário (R$)	Melhor do tempo médio de execução (0.5)	A	5
14	0.811 de Tempo médio de execução da atividade	Melhor grau de risco da atividade (1)	A	5
15	21.000 de Energia agregada (kWh/UC)	Melhor do Número de padronizações (3800)	B	5
16	2195.688 de Número de unidades para padronização	Melhor do Custo médio unitário (R$) (67.61)	A	5
17	1136.198 de Custo médio unitário (R$)	Melhor do tempo médio de execução (0.5)	B	5
18	0.863 de Tempo médio de execução da atividade	Melhor grau de risco da atividade (1)	A	5
19	24.500 de Energia agregada (kWh/UC)	Melhor do Número de padronizações (3800)	A	5
20	2081.094 de Número de unidades para padronização	Melhor do Custo médio unitário (R$) (67.61)	A	5
21	1087.626 de Custo médio unitário (R$)	Melhor do tempo médio de execução (0.5)	A	5
22	0.889 de Tempo médio de execução da atividade	Melhor grau de risco da atividade (1)	A	5
23	22.750 de Energia agregada (kWh/UC)	Melhor do Número de padronizações (3800)	A	5
24	2023.797 de Número de unidades para padronização	Melhor do Custo médio unitário (R$) (67.61)	A	6

Fonte: autoria própria.

Durante este processo, algumas observações merecem destaque e são relatadas a seguir. Entre o primeiro e o terceiro ciclo os resultados apontam para uma única classificação, as relações entre as alternativa blindagem, religação e substituição de medidor se mantém incomparáveis, e o espaço para as constantes de escalas (pesos) são reduzidos.

No quarto ciclo, no qual se compara o desempenho intermediário do critério custo com o melhor desempenho do critério "tempo", o decisor opta em preferência estrita pela primeira consequência. A atualização do espaço de peso gera uma nova ordenação parcial com a definição de três posições. Com a alteração, o decisor solicita a visualização do diagrama de Hasse, onde foram observadas incomparabilidade entre as alternativas "blindagem" e "religação" na primeira posição, regularização e substituição na segunda posição, e entre "externalização" e "suspensão de fornecimento" na terceira posição, além da divisão das três posições pelas linhas pontilhadas, como pode ser observado na Figura 11.

Figura 11 - Diagrama de Hasse após quarto ciclo.



Fonte: autoria própria.

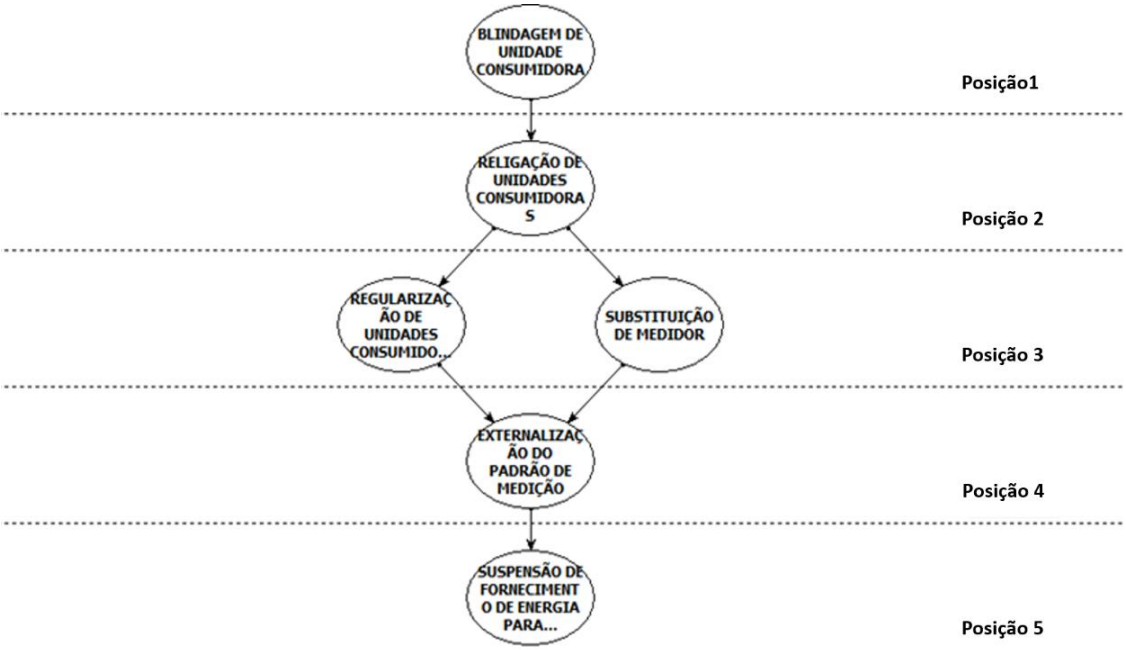
Posteriormente, no sexto ciclo, nota-se que a declaração de indiferença entre o desempenho intermediária do critério "grau de risco" da atividade e o "melhor desempenho" para o "grau de proteção da atividade", não alterou o estado das posições, porém atualizou o intervalo das constantes de escalas como esperado.

Logo após, com a resposta da sétima questão, comparando as consequências de 25% do máximo desempenho do critério "energia agregada" com o maior desempenho para o critério "número de padronizações", a execução do PPL gera uma nova posição. Neste ponto, mantêm-se as condições da primeira e segunda posição, apresentado as alternativas externalização e suspensão do fornecimento, na terceira e quarta posição respectivamente. Aqui, o decisor percebe que tem informações suficiente para fundamentar a escolha de quatro intervenções se assim desejar, ou optar pela avaliação

holística para finalizar o problema, efetuando a comparação entre as duas alternativas da primeira posição, e de mesmo modo comparando as alternativas da segunda posição, a fim de confrontar as alternativas incomparáveis. Todavia, ele opta por continuar a elicitação por decomposição, sem visualizar os gráficos de desempenhos das alternativas incomparáveis de cada posição.

No décimo primeiro ciclo, que compara 12,5 % do máximo desempenho do critério "energia agregada" com o sumo desempenho do critério "número de padronizações", o decisor escolhe a consequência B. Assim, a atualização do espaço das constates de escala ordena as alternativas em cinco posições, observando que na terceira posição permanece uma incomparabilidade entre as alternativas regularização de clandestino e substituição de medidor, conforme apresentado na Figura 12.

Figura 12 - Diagrama de Hasse após o 11º ciclo.

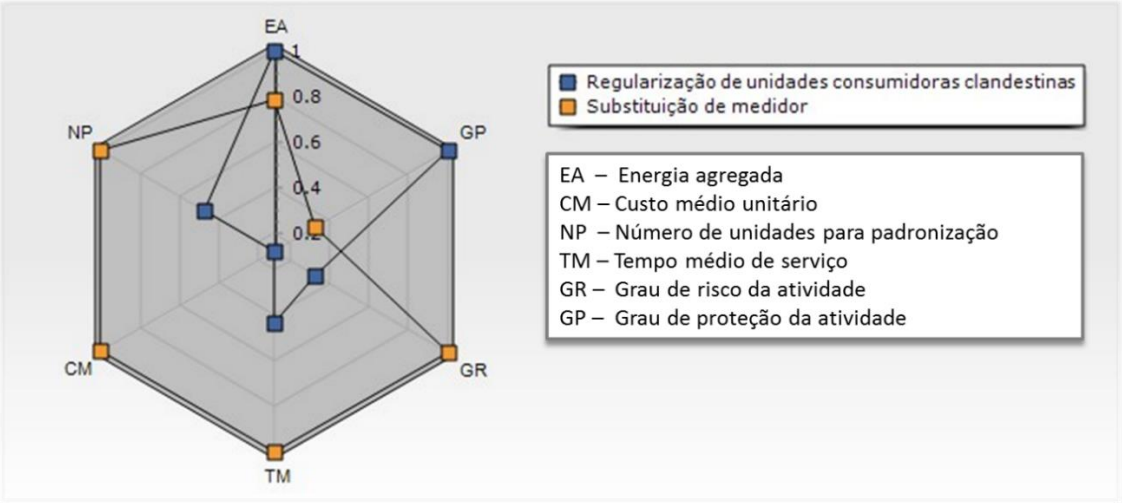


Fonte: autoria própria.

Neste momento, o decisor entende que é possível identificar a alternativa com melhor desempenho a partir das suas preferências. Ao constatar a possibilidade de finalizar da ordenação a partir da avalição holística, solicita vista ao gráfico radar de desempenho das duas alternativas incomparáveis que compõem a terceira posição. Entretanto, identifica grandes diferenças entre os desempenhos para os critérios avaliados (Gráfico 1), o que torna inviável uma definição avaliando holisticamente o problema.

Sendo assim, o decisor escolhe seguir com o processo de elicitação flexível através da comparação de desempenho entre os pares de critérios. A possibilidade de finalização do processo com ordenação parcial, ou de avaliação holística para comparação dos desempenhos das alternativas da terceira posição, “regularização de clandestino” e “substituição do medidor”, permanecem inalterados da décima primeira até a vigésima terceira interação. É importante destacar que no décimo terceiro e no décimo sétimo ciclo o decisor solicitou novamente a observação do gráfico de desempenho que permitem comparar holisticamente as alternativas. As respostas durante estes ciclos, provocaram sucessivas atualizações do espaço de pesos (constates de escalas), fazendo com que os intervalos fossem reduzidos.

Gráfico 1 – Diferença entre os desempenhos das alternativas de regularização de clandestino e substituição de medidor nos critérios avaliados.



Fonte: autoria própria

Por fim, na vigésima quarta iteração em que o decisor é convidado a comparar a consequência do desempenho intermediário do número de padronizações com o melhor desempenho do custo médio unitário, em que a primeira consequência é escolhida, o PPL calcula e ordena as seis alternativas.

Em conclusão, o SAD FITradeoff também fornece em ordem decrescente o intervalo de valores para as constantes de escala que maximizam o valor geral de cada alternativa. A extensão destes intervalos representa os valores máximos e mínimos entre os quais as constantes de escala de cada critério podem variar sem alterações na ordenação das alternativas. Essas informações são descritas na Tabela 4.

Tabela 4 – Intervalo das constantes de escala na finalização do processo.

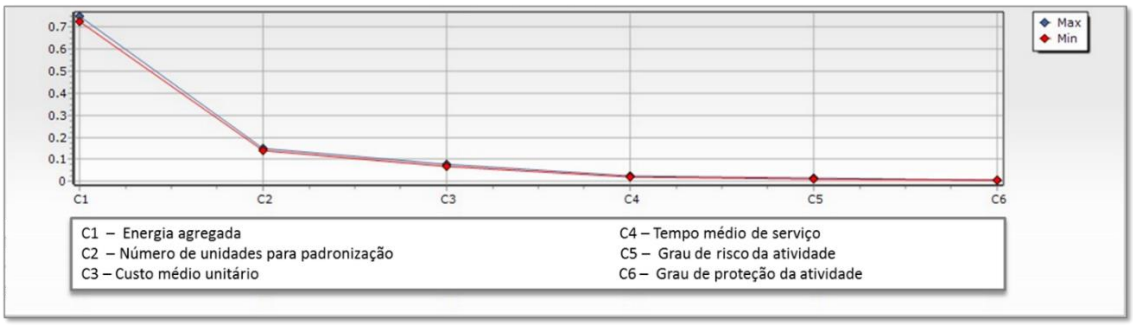
	Energia agregada	Número de unidades para padronização	Custo médio	Tempo médio de execução da atividade	Grau de risco da atividade	Grau de proteção da atividade
Max	0,75	0,15	0,08	0,03	0,01	0,01
Min	0,73	0,14	0,07	0,02	0,01	0,01

Fonte: autoria própria.

Como pode ser visto na Tabela 4, as constantes de escala dos critérios EA e NP possuem maiores intervalos de valores que poderiam ser assumidos. Este fato está alinhado com a avaliação holística inicial dos critérios feita pelo tomador de decisão, ao julgar estes dois critérios como mais relevantes na problemática, fazendo com que a intervenção "blindagem de unidade consumidora", com desempenho considerado para estes atributos, fosse classificada como a mais preferível.

No Gráfico 2, é possível observar a atualização dos espaços de pesos, através da redução do intervalo das constantes de escala no 24º ciclo.

Gráfico 2 – Intervalo das constantes de escalas dos critérios do 24º ciclo.

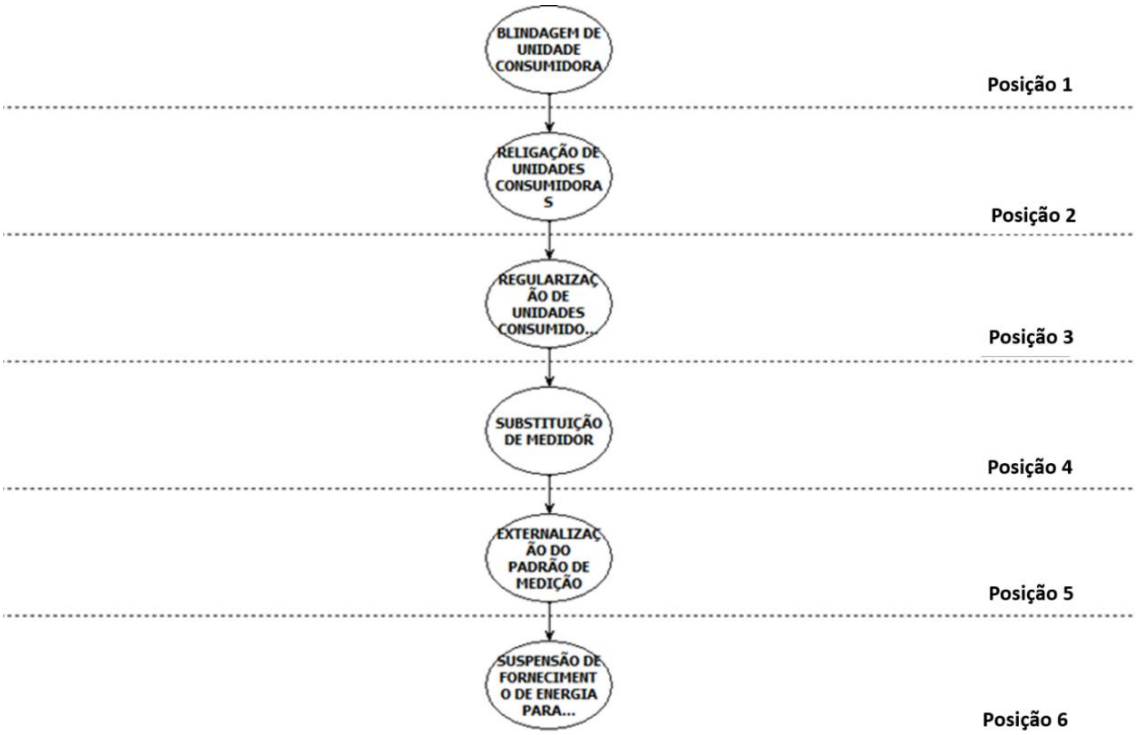


Fonte: autoria própria.

Como resultado do processo, foi gerada uma ordenação das seis alternativas, identificando como a mais preferível a medida de "blindagem de unidade consumidoras", seguida por "religação de consumidores", "regularização de clandestinos", "substituição de medidor", "externalização da medição", e por fim, a "suspensão do fornecimento de energia de clientes autoreligados", declarada a menos relevante no contexto de prevenção e combate a PNT, dentro do cenário avaliado. Na Figura 13, está representada a ordenação, através da ferramenta de visualização gráfica (diagrama de Hasse), fornecendo uma visão mais ampla das relações de dominância, caracterizadas por setas direcionadas entre as alternativas, e linhas tracejadas entre as posições.

Dado o resultado do processo, o SAD na ferramenta *web* franqueia a possibilidade de se realizar uma análise de sensibilidade a fim de verificar a robustez dos resultados encontrados.

Figura 133 - Diagrama de Hasse após o 24º ciclo.

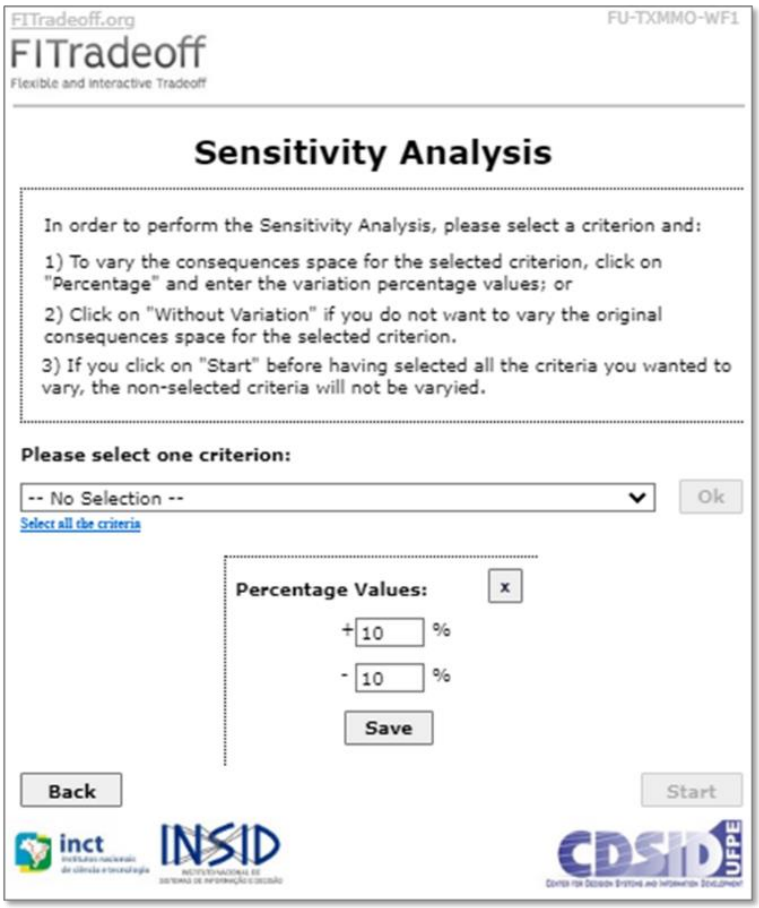


Fonte: autoria própria.

5.3.1 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Observado o interesse em validar os resultados, uma análise de sensibilidade do modelo de avalição foi realizada, alterando ligeiramente o desempenho das alternativas apresentados na matriz de consequência. A variação de desempenho foi simulada dentro dos limites de – 10% a + 10% da consequência original, mantendo a faixa inicialmente sugerida pela ferramenta *web* (Figura 14), e fixo o espaço das constantes de escalas apuradas.

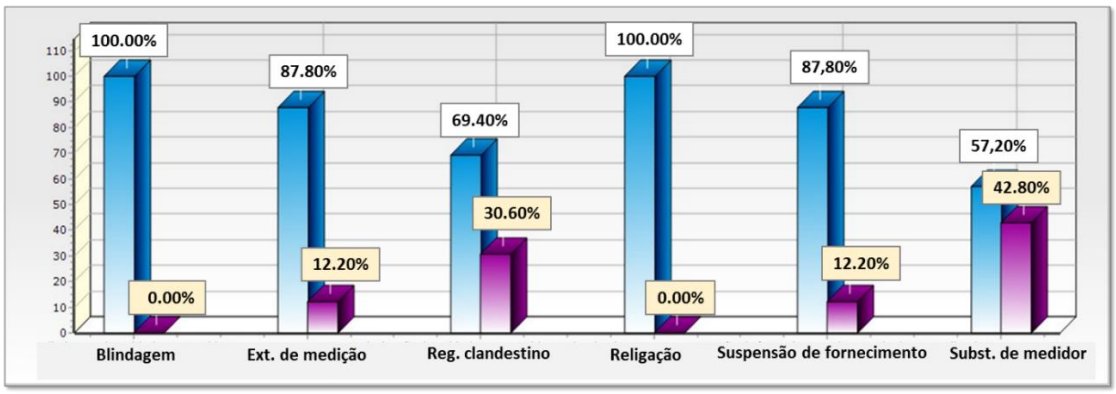
Figura 144 - Análise de sensibilidade SAD FITradeoff.



Fonte: autoria própria.

Na Figura 15 a seguir, resultante da simulação, é possível observar a porcentagem de vezes que cada alternativa permanece na posição original.

Figura 15 - Resultado da análise de sensibilidade.



Fonte: autoria própria.

Complementarmente, na Tabela 5, observa-se o percentual de ocorrências em que as alternativas permaneceram nas posições originalmente estabelecidas, e o percentual em que elas ocuparam as demais posições.

Tabela 5 – Porcentagem de vezes que as alternativas são estabelecidas em cada posição.

Posição	Blindagem	Religação	Regularização de clandestino	Substituição de medidor	Externalização	Suspensão do fornecimento de energia
1	100,00%	-	-	-	-	-
2	-	100,00%	-	-	-	-
3	-	-	69,40%	42,80%	-	-
4	-	-	30,60%	57,20%	12,20%	-
5	-	-	-	-	87,80%	12,20%
6	-	-	-	-	-	87,80%

Fonte: autoria própria.

Constata-se que a alternativa “blindagem” permanece como solução preferencial em 100% das simulações, ou seja, não há nenhuma resposta equivalente, o que indica uma solução robusta para a posição. Do mesmo modo, na segunda colocação, a medida de “religação” permanece inalterada para todos os casos simulados. Todavia, o resultado da simulação para a terceira posição apresentou sensibilidade, observando que a alternativa “regularização de clandestino” representa a posição em 69,40%, e a alternativa “substituição de medidor” em 42,80%, dado que em 12,20% dos casos simulados a terceira posição foi composta por ambas alternativas. Nestes casos, as simulações estabeleceram uma ordenação incompleta, com cinco posições. Dessa forma, no quarto lugar, a alternativa “substituição de medidor” permanece inalterada em 57,20% dos casos simulados, sendo considerada solução equivalente em 30,60% dos casos a “regularização de clandestino”. Entretanto, nos casos de ordenação com cinco posições (12,20%) a “externalização” compõe a colocação. A quinta posição permanece representada pela “externalização” em 87,80% dos casos, sendo substituída nos casos de ordenação incompleta pela “suspensão do fornecimento de energia”. A análise de sensibilidade também revela que a “suspensão do fornecimento de energia” permanece como a alternativa menos atraente.

Também é possível observar na análise de sensibilidade, a influência da concorrência entre os diferentes desempenhos das alternativas “regularização de clandestinos” e “substituição de medidor”, que ocupam preferencialmente a terceira e quarta posição da ordenação.

Dessa forma, os resultados da análise indicam que são robustas as soluções para a primeira e a segunda posição. Contudo para as demais posições as respostas apresentam sensibilidade, visto que são incluídas soluções equivalentes para estas colocações, apesar de permanecerem inalterados na maior parte das simulações. É importante destacar que

as alterações de posicionamento sempre ocorrem entre duas soluções equivalente posicionadas primitivamente em colocações adjacentes.

Com a razoável robustez dos resultados comprovada, é possível indicar uma ordenação de intervenções, que possam sustentar a tomada de decisão dos responsáveis pelo controle das PNT nas empresas distribuidoras de energia elétrica.

Dessa forma, conclui-se o modelo de avalição pode ser considerado uma solução atraente para problemas de avaliação das medidas de prevenção e combate a PNT.

5.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com base nos resultados obtidos a partir do modelo foram identificados seis níveis de classificação atendendo à ordenação completa das alternativas após 24 ciclos, indicando a medida "blindagem de unidade consumidora", como a intervenção a ser primeiramente empregada na prevenção e combate a PNT nos circuitos avaliados.

Durante a aplicação do modelo proposto para a solução do problema de ordenação através do SAD FITradeoff, foi possível notar alguns pontos singulares a este processo. O primeiro deles destaca que após a classificação das constantes de escalas, a ordenação apresenta apenas um nível, que permanece inalterado até o quarto ciclo, quando a primeira, segunda e terceira posição são indicadas. Neste ponto em cada uma das colocações foram apontadas duas alternativas, incomparáveis entre si, devido à relevante diferença de desempenho entre os critérios. Na continuação do processo, a partir das escolhas do decisor, o sistema foi capaz de apresentar o quarto nível no sétimo ciclo, e a quinta posição no décimo primeiro ciclo. Doravante, as disparidades entre o desempenho dos critérios das alternativas na terceira posição ("regularização de clandestino" e "substituição de medidor"), acompanhada pela predileção do decisor em manter o procedimento de comparação entre os critérios ao invés de optar pela a avaliação holística, promovem mais treze iterações até a ordenação completa das alternativas.

No processo de validação do modelo são discutidas as suas particularidades, com destaque para o elevado número de perguntas necessárias para apuração do resultado. Observa-se que para a maioria dos problemas, o método FITradeoff promove uma redução no número de questionamentos, quando comparado ao método *Tradeoff* tradicional [91]. Atendendo esta lógica, neste problema utilizando o método tradicional, o decisor deveria avaliar um número de 3 *x* (número de critérios - 1), ou seja, 18 relações

de indiferença, contudo foram necessárias 24 perguntas para completa ordenação. Esta singularidade deve-se preferencialmente a dois aspectos: (a) a partir da 11ª iteração, o decisor tem a oportunidade de avaliar holisticamente a preferência entre as alternativas que ocupavam mutuamente a 3ª posição, porém devido as diferenças entre os desempenhos dos critérios para as alternativas, opta por manter o processo comparativo; (b) como apresentado em [91], a distribuição dos valores das constante de escala, é o fator que mais afeta o desempenho do FITradeoff em relação ao número de perguntas, e como pode-se observar na Tabela 4, o intervalo da constante de escala do critério k_{EA} é superior a 10 vezes o padrão da constante do critério K_{GP}.

No entanto, apesar do modelo requerer um número superior de questionamentos para solucionar o problema, a heurística presente no procedimento FITradeoff que reduz o esforço cognitivo durante cada interação, e consequentemente atenua as inconsistências dos resultados, mantém válida a escolha do modelo.

Comparativamente com o processo de seleção aplicado atualmente na concessionária avaliada, que ora considera o desempenho da energia agregada média, outrora pondera o número de unidades a serem padronizadas, o modelo apresenta uma resposta diferente.

É importante observar que durante o processo de estabelecimento dos critérios, na parametrização do modelo de avaliação, a aplicação do método VFT com apoio do decisor, definiu objetivos a partir de valores amplos, que abrangem diversos panoramas de PNT, muitas vezes comuns a outras distribuidoras. Esta característica garante versatilidade na adaptação para aplicação a outros contextos. Todavia, a comparação entre os processos de seleção apresentados na Tabela 6, leva em consideração apenas a área (circuitos) sobre a qual a pesquisa desenvolveu o estudo.

Tabela 6 –Comparação entre os modelos de avaliação.

Alternativas	Modelos de avaliação		
	FITradeoff	Energia agregada (kWh/UC)	Número de unidades para padronização
Blindagem da unidade consumidora	1º	2º	1º
Religação de unidades consumidoras	2º	1º	2º
Regularização de unidades consumidoras clandestinas	3º	3º	6º
Substituição de medidor	4º	4º	4º
Externalização do padrão de medição	5º	5º	3º
Suspensão do fornecimento de energia de auto religados	6º	6º	5º

Fonte: autoria própria.

Analisando os resultados das diferentes ordenações, nota-se que a solução proposta pelo FITradeoff é fortemente influenciada pela primeira etapa do SAD, quando acontece a ordenação dos critérios, que neste caso atende pela seguinte ordem: $k_{EA} > k_{NP} > k_{CM} > k_{TM} > k_{GR} > k_{GP}$, conforme preferência do decisor. O primeiro e segundo critério selecionados, de acordo com a preferência do decisor, correspondem aos critérios utilizados atualmente em separado para avaliação das medidas.

Na Tabela 6, é possível observar que apesar de não possuir o desempenho mais crítico para o critério energia agregada a "blindagem de unidade consumidora" é indicada como a medida a ser priorizada pelo modelo. Isso se deve pela influência do segundo critério escolhido, "número de padronizações". A segunda colocação é ocupada pela "religação", também afetada pelos dois critérios mais relevantes (EA e NP). Por outro lado, eles também indicam uma convergência para atividade menos atrativa, a "suspensão do fornecimento de energia", que possui o pior desempenho para critério energia agregada, e o penúltimo desempenho para o número de padronizações. Para as demais posições o modelo prova sua capacidade, analisando os múltiplos desempenhos das diferentes alternativas. É importante notar que não é apenas a importância relativa entre os critérios que afeta o valor de sua constante de escala, mas também a variação de desempenho entre a alternativa com menor e maior resultado. Os critérios grau de risco e grau de proteção tem constantes muito baixas, porém, juntos esses critérios podem afetar significativamente a decisão, quando consideradas as informações obtidas até o final do processo de elicitação.

Em complemento a avaliação das alternativas, a análise de sensibilidade garante robustez para as soluções da primeira e segunda colocação. Nas demais posições, as respostas das simulações da análise apesar de sensíveis, permanecem inalteradas para maioria dos casos, em especial para quinta e última posição que se mantém 87,70%, comprovando que o resultado apresentado é comparativamente mais robusto para todas as colocações.

Os resultados da avaliação das medidas de prevenção e combate a perdas não-técnicas na distribuição de energia elétrica, obtidos através do modelo, demostram ser bastante instrutiva segundo percepção do decisor, em especial na apresentação do diagrama de Hasse.

Associado a esta propriedade, o modelo permite ponderar facilmente diferentes fatores de decisão (EA, NP, CM, TM, GR e GP) que influenciam a rotina operacional da empresa distribuidora de energia. Estes aspectos corriqueiramente analisados em

separado, produzem uma série de definições conflituosas, o que reforça a importância da utilização do modelo para a solução do problema.

Por fim, pode-se afirmar que a rapidez, a flexibilidade, o baixo esforço cognitivo empregado durante o processo, além da clareza e robustez dos resultados, ao avaliar diferentes alternativas sob diversos desempenhos em múltiplos critérios, garantem grande atratividade ao modelo proposto.

6 CONCLUSÃO

Neste capítulo apresentam-se as conclusões relacionadas à pesquisa, bem como as propostas para pesquisas futuras.

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Observando que para a sociedade moderna a energia elétrica é cada vez mais indispensável, e que as políticas de sustentabilidade são imprescindíveis para a otimização dos recursos disponíveis, a avaliação das medidas de prevenção e combate a perdas não-técnicas é fundamental no direcionamento de estratégias de eficientização na distribuição de energia. Associado ao processo está a otimização dos recursos técnicos e financeiros das empresas distribuidoras de energia.

Assim, no presente trabalho foi apresentado o uso de um método de apoio à decisão multicritério para ordenar em prioridade as ações frequentemente aplicadas no combate de PNT. Entretanto, a carência na propagação do conhecimento sobre medidas de prevenção e combate a perdas não-técnicas limitam o surgimento de novas ideias. Neste sentido, a principal dificuldade encontrada neste estudo foi a restrição de acesso a dados sobre perdas. Este cenário gerou a necessidade do laborioso levantamento em campo de informações sobre o assunto.

Inicialmente, com objetivo de adquirir conhecimento sobre o tema, foram avaliados mecanismos apresentados em trabalhos relevantes da literatura que contribuíram com o propósito de redução de perdas, onde foram identificadas: medidas operacionais, e técnicas de detecção de fraudes. Todavia, durante a investigação foi detectada a escassez de pesquisa que proponham avaliar (escolher, classificar ou ordenar) as intervenções comumente aplicadas.

Logo após, uma nova revisão da literatura orientada para os métodos de apoio a decisão foi realizada, sendo constatadas diversas oportunidades para solução de problemas na área de energia, envolvendo matriz energética, eficiência e comercialização, consolidando a conveniência para aplicação da técnica.

Com propósito de validar o contexto do problema apresentado, e fornecer informações relevantes para futura aplicação do modelo de avaliação, foram realizados diversos diagnósticos em campo. Para tal, foram investigadas as características das perdas não-técnicas em 45 circuitos de distribuição de energia, que atendem 5.123 unidades consumidoras.

Dado o problema de natureza de ordenação e a racionalidade compensatória do decisor, foi identificada a oportunidade de proposição de um modelo, baseado em um método de apoio à decisão multicritério capaz de agregar flexibilidade e clareza ao processo de avalição das alternativas a partir de informações parciais. Assim, foi definido a aplicação do FITradeoff para problemática de ordenação.

Em seguida, na parametrização do modelo, para identificação dos critérios utilizados na avalição das alternativas foi aplicada a consolidada técnica *Value Focused Thinking* (VFT) que reconheceu com integridade os valores do decisor. A estruturação do modelo ainda contou com apoio de especialistas e informações da distribuidora de energia.

Posteriormente, o modelo foi aplicado por meio da interação do decisor com o SAD FITradeoff, para a avaliação de seis alternativas corriqueiramente utilizadas na prevenção e combate a perdas não-técnicas nos circuitos analisados. Como resultado foi encontrada uma ordenação para as intervenções, identificando como a mais preferível a medida de “blindagem de unidade consumidora, seguida por “religação de consumidores”, “regularização de clandestinos”, “substituição de medidor”, “externalização da medição”, e por fim, a “suspensão do fornecimento de energia de clientes auto religados”, declarada a menos relevante no contexto de prevenção e combate a PNT, dentro do cenário avaliado.

Com o objetivo de validar os resultados, uma análise de sensibilidade foi realizada, garantido aplicabilidade e robustez ao modelo. Adicionalmente, o resultado foi comparado com os estudos normalmente empregado pela concessionária, que apesar de apontarem diferenças, estão alinhados com a proposta de minimização das perdas.

Na avaliação do decisor, a nitidez na apresentação dos resultados, agregado pela agilidade e versatilidade do processo de interação com o SAD, promovem a utilização da

ferramenta, quando ponderada a acedente complexidade das decisões frente a limitada disponibilidade de tempo dos gestores para estruturação deste tipo de problema. Neste ponto, deve-se considerar a capacidade de adaptação do modelo para atender um número maior de decisores, necessitando para isso, de um novo estágio de estruturação.

Efetivamente, os fundamentos apresentados pelo decisor convergem com a proposta do método FITradeoff, que baseado em uma estrutura axiomática forte, oferece uma forma flexível e interativa de obter as informações de preferência do decisor, sem exigir um alto esforço cognitivo.

Ressalta-se ainda, as qualidades identificadas no modelo de avaliação, tais como eficiência, flexibilidade e clareza, que permitiram avaliar e indicar de forma prática as ações que devem ser priorizadas na redução das perdas baseado nas vantagens do método FITradeoff para a problemática de ordenação disponíveis no SAD da ferramenta. Além disso, o modelo proposto tem a capacidade de se adaptar a outros contextos e ser reproduzido na solução de novos problemas relacionados a perdas não-técnicas, sem deixar a praticidade oferecida.

Destaca-se ainda que este trabalho foi realizado durante a pandemia da COVID-19, a qual impôs barreiras à pesquisa de campo, à consulta de especialistas e às entrevistas com o decisor. Dessa forma, o estudo limitou-se a avaliar diferentes circuitos de uma mesma região com alto índice de perdas, segundo as preferências de apenas um decisor. Como resultado, as alternativas avaliadas foram limitadas, porém suficiente para a demonstração da aplicabilidade e robustez do modelo.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

A capacidade de adaptação do modelo a outros contextos, a partir da readequação de parâmetros e informações dos cenários a serem avaliados, colaboram com a sugestão de novas explorações. Assim, sugere-se para trabalhos futuros:

- A estruturação de um novo modelo para ordenar os atendimentos aos circuitos de distribuição em uma dada região com elevados índices de perdas, considerando o contexto de redução de perdas não-técnicas e o interesse em priorizar ações para mitigação do problema;

- Desenvolvimento de novos estudos que incorporem ao modelo novos parâmetros de avaliação, em particular a inserção de novas alternativas aplicadas em outas empresas distribuidoras de energia;
- Estudo da viabilidade de desenvolvimento de novos modelos fundamentados em outros métodos multicritério, considerando diferentes propostas e estrutura (racionalidade e preferências) que atendam a necessidade do processo específico;
- Expandir a base de dados utilizada pelo modelo, progredindo no processo de captura de informação, seja diretamente, pelo levantamento em campo, ou indiretamente, através do aproveitamento de dados do processo de leitura desenvolvido pelas empresas distribuidoras de energia;
- Desenvolver um modelo baseado na problemática de portfólio, capaz de avaliar e indicar as intervenções a serem aplicadas na mitigação das perdas não-técnicas de acordo com o cenário avaliado;
- Ampliar a pesquisa e a divulgação sobre técnicas e processos de gerenciamento que contribuem com a redução das perdas não-técnicas.

REFERÊNCIAS

[1] HAMMERSCHMITT, B.K., et al., "Non-Technical Losses Review and Possible Methodology Solutions," *2020 6th International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS), Istanbul, Turkey,,* pp. 64-68, 05 Outubro 2020.

[2] DEPURU, S. S. S. R. , WANG, L. , DEVABHAKTUNI, V. and GUDI,N., "Measures and setbacks for controlling electricity theft," *North American Power Symposium 2010, Arlington, TX,* pp. 1-8, 26 Setembro 2010.

[3] NIZAR, A. H. , and DONG, Z. Y., "Identification and detection of electricity customer behavior irregularities," *IEEE/PES Power SystemsConference and Exposition, Seattle, Washington, United States,* pp. 1-10, 15-18 Março 2009.

[4] NAGI, J. , YAP, K. S.,TIONG, S. K. , AHMED, S. K. , MOHAMAD, M., "Non technical loss detection for metered customers in power utility using support vector machines," *IEEE Trans. Power Del., vol. 25, no. 2,* pp. 1162-1171, Abril 2010.

[5] NIZAR, A. H. , DONG, Z. Y. , and WANG, Y., "Power utility nontechnical loss analysis with extreme learning machine model," *IEEE Trans. PowerSyst., vol. 23, no. 3, August 2008.,* p. 946–955, Agosto 2008.

[6] A. GAWLAK, "The influence of investment on reducing energy losses in distribution networks," *2015 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Kouty nad Desnou, Czech Republic,* pp. 315-319, Maio 2015.

[7] ANEEL, "Perdas de Energia Elétrica na Distribuição, 2021," [Online]. Available: https://www.aneel.gov.br/documents/654800/18766993/Relat%C3%B3rio+Perdas+de+Energia_+Edi%C3%A7%C3%A3o+12021.pdf/143904c4-3e1d-a4d6-c6f0-94af77bac02a. [Acesso em 09 08 2021].

[8] ANEEL, "Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Módulo 7– Cálculo de Perdas na Distribuição," Agência Nacional de Energia Elétrica, 2018. [Online]. Available: https://www.aneel.gov.br/modulo-7. [Acesso em 21 Março 2020].

[9] PERALTA, J. , CHEUNG, A. , PEDLEY, M. and TAO, J., "BC Hydro's methodology for energy losses assessment in distribution systems," *2009 IEEE Electrical Power & Energy Conference (EPEC), Montreal, QC,* pp. 1-6, Outubro 2009.

[10] SALMAN et al., "Simulation Framework of Non-Technical Losses Detection in Micro Grid Environment," *2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Changsha, China,* pp. 2314-2318, 8 Novembro 2019.

[11] J. R. AGUERO, "Improving the efficiency of power distribution systems through technical and non-technical losses reduction," *PES T&D 2012, Orlando, FL,* pp. 1-8, Maio 2012.

[12] PENNER, N. , BETTIOL, A. L. ,CORTINA, J. A. L., PASSOS, F. d. N. , CARNIATO, A. and MARTIN, R. P., "Equipment for monitoring and combating of non-technical losses in distribution networks: Design and preliminary results," *2014 49th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Cluj-Napoca,* Maio 2014.

[13] ALVES, R. ,CASANOVA, P. ,QUIROGAS, E. ,RAVELO, O. and GIMENEZ, W., "Reduction of Non-Technical Losses by Modernization and Updating of Measurement Systems," *2006 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America, Caracas,* pp. 1-5, Agosto 2006.

[14] LEITE, J. B. and MANTOVANI, J. R. S., "Detecting and Locating Non-Technical Losses in Modern Distribution Networks," *IEEE Transactions on Smart Grid,* vol. 9, nº 2, pp. 1023-1032, Março 2018.

[15] MADRIGAL, M. , RICO, J. J. and UZCATEGUI, L., "Estimation of Non-Technical Energy Losses in Electrical Distribution Systems," *IEEE Latin America Transactions,* vol. 15, nº 8, pp. 1447-1452, 2017.

[16] GLAUNER, P. , BOECHAT, A., DOLBERG, L., STATE, R., BETTINGER, F., RANGONI, Y., and DUARTE, D., "Large-scale detection of non-technical losses in imbalanced data sets," *2016 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), Minneapolis, MN,* pp. 1-5, Setembro 2016.

[17] GOMES, L. F. A. M , GOMES, C. F. S. , ALMEIDA, A. T. de, Tomada de decisão gerencial: o enfoque multicritério. 3 ed., Rio de Janeiro: Atlas, 2009.

[18] YIP, S. -C. , TAN C., TAN, W. -N. , GAN, M. -T. , WONG, K., and PHAN, RC. -C., “Detection of Energy Theft and Metering Defects in Advanced Metering Infrastructure Using Analytics,” *2018 International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE), Kajang,* pp. 15-22, Junho 2018.

[19] EPE , “Anuário Estatístico de Energia Elétrica,” Empresa de Pesquisa Energética, 2021. [Online]. Available: http://shinyepe.brazilsouth.cloudapp.azure.com:3838/anuario/. [Acesso em 08 03 2022].

[20] J. CLEVELAND, “Energia Hoje,” Editora Brasil Energia, 08 09 2021. [Online]. Available: https://energiahoje.editorabrasilenergia.com.br/a-crise-energetica-no-brasil-em-2021/. [Acesso em 09 03 2022].

[21] SILVA, A. C. C. G.; FONTES, C. H. O.; BARBOSA, A. S., “Multicriteria evaluation model for organizational performance management applied to the Polo Fruit Exporter of the São Francisco Valley,” *Computers and Electronics in Agriculture,* vol. 117, pp. 168-176, 2015.

[22] MIRANDA, C.M. & ALMEIDA, A.T., “Gestão de Empreendimentos de Construção Civil com Avaliação Multicritério,” em *Qualidade e Inovação em Serviços: Contribuições da Engenhraia de Produção*, Recife, Universitária, 2003, pp. 23-43.

[23] OLIVEIRA V.; FERREIRA D. V.; FERREIRA T.V., “A Study on the Anatomy of Losses in Electric Energy,” *Ingeniería Energética,* vol. 43, nº 1, 2022.

[24] ROSAKIS, S., SOURIE, J.C., VANDERPOOTEN, D., “Integrated micro-economic modeling and multi-criteria methodology to support public decision-making: the case of liquid bio-fuels in France.,” *Biomass and Energy,* nº 20, pp. 385-398, 2001.

[25] A. T. d. ALMEIDA, Processo de decisão nas organizações: construindo modelos de decisão multicritério, São Paulo: Atlas, 2013.

[26] NIZAR, A. H. , DONG, Z. Y. , JALALUDIM, M. and RAFFLES, M. J. , “Load Profiling Method in Detecting non-Technical Loss Activities in a Power Utility,” *2006 IEEE International Power and Energy Conference, Putra Jaya,* pp. 82-87, Novembro 2006.

[27] G. A. Q. R. a. R. A. Gallego, “Advanced analytics for non-technical losses of energy,” *2015 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LATAM), Montevideo,* pp. 579-584, Outubro 2015.

[28] PENIN, C. A. D. S., *Penin, C. A. D. S. (2008). Combate, prevenção e otimização das perdas comerciais de energia elétrica,* São Paulo: Dissertação de Dotoraddo, Universidade de São Paulo, 2008.

[29] M. POVEDA, “A new method to calculate power distribution losses in an environment of high unregistered loads,” *1999 IEEE Transmission and Distribution Conference,* vol. 2, pp. 609-614, 1999.

[30] NETO, E. A., COELHO, J., “Probabilistic Methodology for Technical and Non-Technical Losses Estimation in Distribution System,” *Elsevier, Electric Power Systems Research,* vol. 97, p. 93–99, 2013.

[31] DORTOLINA, C.A. , NADIRA R. , “The Loss That is Unknown is No Loss At All: A Top-Down/Bottom-Up Approach for Estimating Distribution Losses,” *IEEE Transactions on Power Systems,* vol. 20, nº 2, pp. 1119-1125, Maio 2005.

[32] GRAINER, J. J. , KENDREW, T. J. , “Evaluation of Technical Losses on Electric Distribution Systems,” *CIRED 10th International Conference on Electricity Distribution, Brighton, UK,* vol. 6, pp. 488-493, Maio 1989.

[33] SHEKMAN, A. L. , “Energy loss computation by using statistical techniques,” *IEEE Transaction on Power Delivery,* vol. 5, p. 254–258, Janeiro 1990.

[34] SAVIER, S. , DAS D. , “Energy Loss Allocation in Radial Distribution Systems: A Comparison of Practical Algorithms,” *IEEE Transactions on Power Delivery,* vol. 24, pp. 260-267, Janeiro 2009.

[35] BARBOZA, A. , COROMOTO, K. , “Proyeto para La Recuperación de Cuentas por Cobrar al Sector Público,” em *V CIERTEC – Seminário Internacional sobre Gestão de Perdas, Eficientização Energética e Proteção de Receita do Setor Elétrico*, Maceío, Agosto de 2005.

[36] ANEEL, “Perdas de Energia,” ANEEL, 02 Agosto 2021. [Online]. Available: https://www.aneel.gov.br/metodologia-distribuicao/-

/asset_publisher/e2INtBH4EC4e/content/perdas/654800?inheritRedirect=false. [Acesso em 09 Novembro 2021].

[37] O. -. O. L. d. Energía, *Manual Latinoamericano y del Caribe para el Control de Pérdidas Eléctricas,* Bogotá – Colombia, Agosto de 1990.

[38] CHANDEL, P. , THAKUR, T. and SAWALE, B. A. , "Energy Meter tampering: Major cause of non-technical losses in Indian distribution sector," *2016 International Conference on Electrical Power and Energy Systems (ICEPES), Bhopal,* pp. 368-371, Dezembro 2016.

[39] SAHOO, S. , NIKOVSKI, D. , MUSO, D. N. AND TSURU, T. , "Electricity Theft Detection Using Smart Meter Data," *2015 IEEE PES Innovative Smart Conferência de Tecnologias Grid (ISGT,* pp. 1-5, Fevereiro 2015.

[40] ANELL, "PRORET - Submódulo 2.6 - Perdas de Energia," 2015. [Online]. Available: http://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2015660_Proret_Submod_2_6_V3. pd. [Acesso em 19 Maio 2021].

[41] YANG, L. , GUO, Z. , "Comprehensive Optimization for Energy Loss Reduction in Distribution Networks," *IEEE PES General Meeting, Conversion and Delivering of Electrical Energy in the 21st Century, Pittsburgh, PA,* pp. 1-8, Julho 2008.

[42] C. CIVIL, "Código Penal - Decreto - lei no 2.848 - Presidência da República," 2020. [Online]. Available: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decretolei/de l2848compilado.htm. [Acesso em 06 Abril 2020].

[43] BUZAU, M. , MEMBER S. , TEJEDOR-AGUILERA, J. , CRUZ-ROMERO, P. , and GÓMEZ-EXPOSITO, A. , "Hybrid Deep Neural Networks for Detection of Non-Technical Losses in Electricity Smart Meters," *IEEE Transactions on Power System,* vol. 35, nº 2, p. 1254–1263, 2020.

[44] NIZAR, A. H. , DONG, Z. Y. , ZHAO, J. H. and ZHANG P. , "A Data Mining Based NTL Analysis Method," *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, FL,* pp. 1-8, 2007.

[45] ANEEL, "Resolução Normativa ANEEL Nº 1.000, de 7 de Dezembro de 2021.," 07 12 2021. [Online]. Available: http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.pdf. [Acesso em 17 01 2022].

[46] CHEN, P. Y. and POPOVICH, P. M. , "Correlation: parametric and nonparametric measures," Lodon, Sage, 2002, p. 95.

[47] V. JUPP, "The Sage Dictionary of Social Research Methods," Lodon, Sage, 2006, p. 43.

[48] MOORE, D. S. , and MCCABE, G. P. , "Introduction to the Practice of Statistics," New York, W.H. Freeman and Company, 2003, p. 127.

[49] PARANHOS, R. , FIGUEIREDO FILHO, D. B. , ROCHA, E. C. da , SILVA JÚNIOR, J. A. da, NEVES, J. A. B. , e SANTOS, M. L. W. D. , "Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson: o Retorno," *Leviathan,* vol. 8, pp. 66-95, 2014.

[50] J. COHEN, Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences, Second Edition, Mahwah, NJ:: Lawrence Erlbaum Associates, 1998.

[51] DANCEY, C. P. , and REIDY J. ,, Estatística Sem Matemática para Psicologia: Usando SPSS para Windows, Porto Alegre: Artmed, 2006.

[52] M. MUKAKA, "A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research," *Malawi Med J,* vol. 24, nº 3, pp. 69-71, Setembro 2012.

[53] H. FISCHER, A History of the Central Limit Theorem, Springer Sciense & Business Media, 2010.

[54] W. J. CONOVER, Practical nonparametric statistics, Vol. 350, New York: John Wiley & Sons, 1998.

[55] KEENEY, R. L. , Value Focused Thinking: A Path to Creative Decision-making, MA: Harvard University Press, 1992.

[56] MORAIS, D. C. , ALENCAR, L. H. , COSTA, A. P. C. S. e KEENEY, R. L. , “Using Value-Focused Thinking in Brazil,” *Pesquisa Operacional,* vol. 33, nº 1, pp. 73-88, 2013.

[57] ALENCAR, L. H. , MOTA, C. M . M., ALENCAR, M. H. , “The problem of disposing of plaster waste from building sites: Problem structuring based on value focus thinking methodology.,” *Waste Management,* vol. 31, nº 12, 2011.

[58] ALMEIDA, A. T. de , “Multicriteria and Multiobjective Models for Risk, Reliability and Maintenance Decision Analysis,” *Springer International Publishing,* vol. 231, 2015.

[59] R. L. KEENEY, “Value-focused thinking: Identifying decision opportunities and creating alternatives.,” *European Journal of operational research,* vol. 92, nº 3, pp. 537-549, 1996.

[60] KIRKWOOD, C. W. , Strategic Decision Making: Multiobjective Decision Analysis with Spreadsheets., Duxbury Press, 1997.

[61] A. T. ALMEIDA, Conhecimento e Uso de Métodos Multicritério de Apoio a Decisão, Editora Universitária, 2009.

[62] GOMES,L. F. A., GOMES, C. F. S., ALMEIDA A.T. de , Tomada de Decisão Gerencial: O Enfoque Multicritério, 2. ed, Rio de Janeiro: Atlas, 2006.

[63] BELTON, V. , STEWART, T. , Multiple criteria decision analysis: an integrated approach , Berlin, Berlin: Springer, 2002.

[64] FIGUEIRA, J. ,GREGO, S. ,EHRGOTT, M. , Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys., Springer, 2005.

[65] B. ROY, Multicriteria Methodology Goes Decision Aiding, Kluwer Academic Publishers, 1996.

[66] WRIGHT, P. L. ,KROLL, M. J. , PARNELL J. , Administração estratégica: conceitos. São Paulo: Atlas, 2000., Atlas, 2000.

[67] ALMEIDA, A. T. & COSTA, A. P. C. S. , Aplicações com Métodos Multicritério de Apoio a Decisão, Recife: Editora Universitéria, 2003.

[68] ALMEIDA, A. T. , COSTA, A. P. C. S. , “Modelo de decisão multicritério para priorização de sistemas de informação com base no método PROMETHEE,” *Gestão & Produção,* vol. 9, nº 2, pp. 201-214, Ago 2002.

[69] SZAJUBOK, N. K. ,ALENCAR, L. H. ,ALMEIDA A. T. de, “Modelo de gerenciamento de materiais na construção civil utilizando avaliação multicritério,” *Production,* vol. 16, nº 2, pp. 303-318, 2006.

[70] MIRANDA, C. M. G. de, ALMEIDA, A. T. de , “Avaliação de pós-graduação com método ELECTRE TRI: o caso de Engenharias III da CAPES,” *Production,* vol. 13, nº 3, pp. 101-112, 2003.

[71] P. VINCKE, Multicriteria Decision-Aid, New York: John Wiley & Sons Ltd., 1992.

[72] KEENEY, L. , RAIFFA H. , R Decision analysis with multiple conflicting objectives., New York: John Wiley & Sons, 1976.

[73] A. T. d. ALMEIDA, “Modelagem Multicritério para Seleção de Intervalos de Manutenção Preventiva Baseada na Teoria da Utilidade Multiatributo,” *Pesquisa Operacional,* vol. 25, nº 1, pp. 69-81, 2005.

[74] EDWARDS, W. & BARRON F. H. , “SMARTS and SMARTER: Improved simple methods for multiattribute utility measurement,” *Organizational behavior and human decision processes,* vol. 60, nº 3, pp. 306-325, 1994.

[75] CLÍMACO, J. N. , ANTUNES, C. H. & ALVES, M. J. G., Programação Linear Multiobjectivo: do modelo de programação linear multiobjectivo à consideração explicita de várias funções objectivo, Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra, 2003.

[76] BOUYSSOU, B. , “Algumas observações sobre a noção de compensação no MCDM,” *European Journal of Operational Research,* vol. 26, nº 1, pp. 150-160, 1986.

[77] BOUYSSOU, D. ,MARCHANT, T. , PIRLOT, M. , PERNY P. , TSOUKIAS, A. & VINCKE P. , Evaluation and decision models: a critical perspective (Vol. 32), Springer Science & Business Media, 2000.

[78] ZHENG, J. & LIENERT, J. , “Stakeholder Interviews with Two MAVT Preference Elicitation Philosophies in a SwissWater Infrastructure Decision: Aggregation Using SWING - Weighting and Disaggregation Using UTA,” *European Journal of Operational Research,* pp. 1-15, 2017.

[79] FREJ, E. A. , ALMEIDA, A. T. de & COSTA, A. P. C. S. , “Using data visualization for ranking alternatives with partial information and interactive tradeoff elicitation,” *Operational Research,* pp. 1-23, 2019.

[80] ALMEIDA, A. T. de ,ALMEIDA, J.A. , COSTA, A.P.C.S, ALMEIDA-FILHO A.T. , “A new method for elicitation of criteria weights in additive models: flexible and interactive tradeoff.,” *European Journal of Operational Research,* vol. 250, nº 1, pp. 179-191, 2016.

[81] VON WINTERFELDT, D. and EDWARDS, W. , Decision Analysis and Bechavioral Research, New York: Cambrigde University Press, 1986.

[82] BORCHERDING, K., EPPEL T. , VON WINTERFELDT, D. , “Comparison of Weighting Judgments in Multiattribute Utility Measurement,” *Management Science,* vol. 37, nº 12, 1991.

[83] WEBER, M. and BORCHERDING, K. , “Behavioral Influences on Weight Judgments in Multiattribute Decision Making,” *European Journal of Operational Research,* vol. 67, nº 1, pp. 1-12, 1993.

[84] KAYA, T. , KAHRAMAN C. , “Multicriteria renewable energy planning using an integrated fuzzy,” *Energy,* vol. 35, nº 6, pp. 2517-27, 2010.

[85] RIABACKE, M. , DANIELSON, M. , EKENBERG L. , “State-of-the-art prescriptive criteria weighting elicitation,” *Advances in Decision Sciences,* pp. 1-24, 2012.

[86] MOUSAVI,M. , GITINAVARD H. , MOUSAVI S. M. , “A soft computing based-modified ELECTRE model for renewable energy policy selection with unknown information,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 68, pp. 771-787, 2017.

[87] MARMOL, A. M. , PUERTO, J. , FERNANDEZ F. R. , “Sequential incorporation of imprecise information in multiple criteria decision processes,” *European Journal of Operational Research,* vol. 137, nº 1, pp. 123-133, 2002.

[88] WEBER, M. , “Decision making with incomplete information,” *European Journal of Research,* vol. 28, nº 1, pp. 44-57, 1987.

[89] JACQUET-LAGREZE, E. & SISKOS, J. , “Assessing a set of additive utility functions for multicriteria decision-making, the UTA method,” *European journal of operational research,* vol. 10, nº 2, pp. 151-164, 1982.

[90] HWANG, C.L. & YOON K., Multiple attribute decision making., Berlin: Springer-Verlag, 1981.

[91] MENDES, J. A. J. , FREJ, E. A. , ALMEIDA, A. T. D. & ALMEIDA, J. A. D. , “Evaluation of Flexible and Interactive Tradeoff Method Based on Numerical Simulation Experiments,” *Pesquisa Operacional,* nº 40, 2020.

[92] KANG, T. H. A. , JÚNIOR, A. M. D. C. S. & ALMEIDA, A. T. de , “Evaluating electric power generation technologies: A multicriteria analysis based on the FITradeoff method,” *Energy,* vol. 165, pp. 10-20, 2018.

[93] KEENEY, R. L. , RAIFFA, H. , MEYER, F. R. , Decisions with multiple objectives: preferences and value trade-offs, Cambridge university press, 1993.

[94] HOLLOWAY, H. A. & WHITE, C.C. , “Question selection for multi-attribute decision-aiding.,” *European Journal of Operational Research,* vol. 148, nº 3, pp. 525-533, 2003.

[95] SARABANDO, P. & DIAS, L. C. , “Multiattribute choice with ordinal information: A comparison of different decision rules,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans,* vol. 39, nº 3, pp. 545-554, 2009.

[96] PARK, K. S. & KIM, S. H. , "Tools for interactive multiattribute decisionmaking with incompletely identified information," *European Journal of Operational Research,* vol. 98, nº 1, pp. 111-123, 1997.

[97] GONZALEZ, G. and FIGUEROA, L. , "Strategic Plan for the Control and Reduction of Non-Technical Losses applied in C.A. Energia Eléctrica de Valencia," *2006 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America, Caracas, 2006,* pp. 1-6, Agosto 2006.

[98] LEON, C. , BISCARRI, F. , MONEDERO, I. , GUERRERO J. I., BISCARRI, J. and MILLAN R. , "Variability and Trend-Based Generalized Rule Induction Model to NTL Detection in Power Companies," *IEEE Transactions on Power Systems,* vol. 26, nº 4, pp. 1798-1807, Novembro 2011.

[99] C. C. O. RAMOS, *Caracterização de Perdas Comerciais em Sistemas de Energia Através de Técnicas Inteligentes,* São Paulo: Tese de Doutorado, 2014, 2014.

[100] PULZ, J. , MULLER, R. B. , ROMERO F. , MEFFE A. , GARCEZ, A. F. and JESUS,A. S. , "Fraud detection in low-voltage electricity consumers using socio-economic indicators and billing profile in smart grids," *CIRED - Open Access Proc. J.,* vol. 2017, nº 1, pp. 2300-2303, 2017.

[101] MOTA, C. M. M. , ALMEIDA, A. T. de , "Método multicritério ELECTRE IV-H para priorização de atividades em projetos," *Pesquisa Operacional,* vol. 27, pp. 247-269, 2007.

[102] MORAIS, D.C. , CAVALCANTE, C. A. V. , ALMEIDA A. T. de , "Priorização de áreas de controle de perdas em redes de distribuição de água," *Pesquisa Operacional,* vol. 30, pp. 15-32, 2010.

[103] KASZOWSKA, B. and WLOCZYK, A. , "Methodology of Calculating Electric Energy Losses in Distribution Networks for the Needs of Assessment of Investment Needs and Effectiveness of Operation of Distribution Companies," *2018 15th International Conference on the European Energy Market (EEM), Lodz,* pp. 1-5, Junho 2018.

[104] DE MACEDO, P.P., MOTA, C.M.D.M., SOLA, A.V.H., "Meeting the Brazilian Energy Efficiency Law: A flexible and interactive multicriteria proposal to replace non-efficient motors," *Sustainable Cities and Society,* vol. 41, pp. 822-832, 2018.

[105] FOSSILE, D. K. , FREJ, E. A. , COSTA, S .E. G.da ,LIMA, E. P. de , & ALMEIDA, A. T. de , "Selecting the Most Viable Renewable Energy Source for Brazilian Ports Using the FITradeoff method," *Journal of Cleaner Production,* nº 121107, 2020.

[106] CDSID - Center for Decision Systems and Information Development, "FITradeoff," UFPE, 31 Mar 2022. [Online]. Available: http://www.cdsid.org.br/fitradeoff/. [Acesso em 17 Mai 2022].

[107] R. LIKERT, "A technique for the measurement of attitudes.," *Archives of psychology,* 1932.

[108] A. Almeida, E. H. Fittipaldi, L.F.A.M Gomes, "Apoio a decisão na comercialização de energia elétrica utilizando o Método de Tomada de Decisão Interativa Multicritério TODIM," *Revista EPIO, - Escuela de Perfeccionamiento en Investigación Operativa,* vol. 20, nº 1, pp. 31-40, 2001.

APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO PARA ELICITAÇÃO DE OBJETIVOS

O objetivo do presente questionário é identificar os objetivos universais da aplicação de ações para a redução de perdas não-técnicas na distribuição de energia elétrica. Neste sentido a pesquisa propõe utilizar o método *Value-Focused Thinking* (VFT) para estruturar os objetivos. (KEENEY, 1992). O VFT inclui um processo para identificar objetivos estratégicos, objetivos fundamentais e objetivos meios. Este processo se dará através de entrevista com o Decisor.

Contexto:

A sociedade moderna é altamente dependente da energia elétrica. Nesta circunstância, o gerenciamento deste recurso torna-se imprescindível para o crescimento econômico e social de vários países. Historicamente, países em desenvolvimento como o Brasil, apresentam uma taxa elevada de perdas de energia. Estas perdas são classificadas em: Perdas Técnicas (PT), e Perdas Não-Técnicas (PNT).

O setor elétrico brasileiro é dividido em três áreas: geração, transmissão e distribuição. É nesta última que concentra grande parte da energia perdida. Sendo assim, as PNT representam um grande problema para as concessionárias distribuidoras de energia, que adotam ações com o objetivo de garantir a saúde financeira, e atender as regulações da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Outro ponto, que merece destaque é a relação direta entre perdas de energia e o valor da tarifa. Dada a sua relevância para a sociedade este assunto é discutido constantemente nos meios de comunicações, como o exemplo o título da matéria apresentada no jornal Folha de São Paulo em 01/05/2021: *"Perda de concessionárias na pandemia deve elevar pedágio e conta de energia."* - Nicola Pamplona.

Em 2010, Depuru *et al.*, foram apresentadas relações entre PNT e aspectos socioeconômicos, dentre eles: taxa de desemprego e analfabetismo. Estas características fazem parte do cenário clássico das periferias brasileiras. Neste contexto, para efeito de pesquisa é investigado a ocorrência de perdas em regiões com renda e taxa de alfabetização abaixo da média, em uma cidade de médio porte, situada na região nordeste do Brasil.

Na situação proposta, são observados os circuitos de distribuição de energia elétrica em regiões que possuem um elevado número de unidades consumidoras (UC) fora de padronização, com irregularidades do tipo: medidor danificado ou com visor

apagado; unidade consumidora clandestina; consumidor auto religado; medição interna; dentre outros.

Alguns dados são apresentados para contextualizar o cenário analisado. Nestas regiões os índices de perdas superam 20%, a média unidade consumidora padronizada fica aquém dos 70%, e o número de unidades conectadas diretamente a rede sem medição (auto religadas ou clandestinas) superam a taxa de 10% do total de UC. Também se encontra unidades com medição interna, ou com defeito no medidor em número significativo. Por fim, verifica-se um número expressivo de unidades com fatura pendente de pagamento.

Dentro do contexto apresentado, foram propostas as seguintes perguntas, para realização de entrevista com o decisor e posterior validação dos especialistas:

1- Observando o cenário apresentado, o que se deseja alcançar com a aplicação de ações de redução de perdas? O que é absolutamente fundamental? (Objetivo)
2- Se você não tivesse nenhuma limitação (técnica, financeira, etc.), quais seriam seus objetivos?
3- Quais seriam as ações mais adequadas a serem adotadas nesta situação?
4- Você concorda que as principais medidas para redução de PNT seriam: blindagem do caixa de medição; regularização de unidades clandestinas; substituição de medidor; externalização do padrão da medição; suspensão do fornecimento de energia para clientes inadimplentes auto religados; religação de unidades consumidoras através de negociação de dívidas? Por favor, justifique. (Opções)
5- Na sua perspectiva que elementos e/ou indicadores podem indicar que o desejo (resultado final) foi alcançado?
6- Existe algum indicador padronizado? Qual? Como podemos mensurá-lo?
7- Para você, dentro deste cenário, o que significa ser eficiente?
8- Dentro das consequências das ações para redução de perdas comercial é possível evidenciar um custo social? Em sua opinião existe relação das ações com a universalização da energia elétrica?
9- Do ponto de vista técnico. Como você poderia medir a eficiência das ações?
10- Existe algum critério de avaliação financeira por tipo de ação? Como ele pode ser medido?
11- Na execução das atividades, aspectos como: tempo, qualidade e segurança são importantes? Como eles podem ser avaliados?

12- O quanto a aplicação destas ações influencia a relação da concessionária com a agência reguladora?
13- Quais impactos estas medidas geram na imagem da concessionária?
14- Por que aplicar ações de combate a perdas? Qual o impacto (ex. técnico, social e econômico)?
15- Das ações apresentadas, ou sugeridas por você, o que é uma alternativa perfeita? Uma alternativa ruim? Você classifica alguma alternativa como razoável? O que é bom ou ruim em cada uma das ações?
16- Dentre as medidas aplicadas sobre a sua gestão, o que aconteceu de bom ou ruim ou que poderia acontecer que lhe preocuparia?
17- Existem limitações na aplicação destas ações? Quais seriam?
18- As ações são analisadas do ponto de vista ambiental? E pela perspectiva socioeconômica? Como posso medir o sucesso para estes quesitos?
19- Você concorda que a aplicação de ações de combate a perdas, devem ocorrer prioritariamente em circuitos ou região onde os índices de perdas são maiores?
20- Por que o um objetivo é mais importante que outro, como você pode alcançá-lo?
21- Como você mede as conquistas deste objetivo? Por que este objetivo X é mais importante quanto o objetivo Y?

ANEXO 1 – ANATOMIA DAS PERDAS

Com a finalidade de retratar a anatomia das perdas nos circuitos a serem considerados, a pesquisa realizou cruzamento entre diferentes variáveis, entre elas o percentual de perdas. O conhecimento do nível de perdas de energia e suas características são fundamentais para avaliar a condição de operação da rede, a qualidade no fornecimento de energia, e a eficácia das ações voltadas à redução de perdas. Para aferição do percentual de perdas de cada circuito foi utilizado o procedimento de balanço energético.

Para caracterizar a anatomia das perdas nestas localidades, foram realizados cruzamento entre diferentes variáveis, tais como:

- Taxa de perdas;
- Número de consumidores clandestinos;
- Volume de clientes auto-religados (clientes inadimplentes conectados à rede elétrica irregularmente);
- Número de unidades com equipamento de medição interno;
- Quantidade de medidores danificados;
- Estoque de clientes desligados;
- Número de postes com conexões irregulares.

As relações foram investigadas por meio de testes de correlação de Pearson e graficamente representadas, a fim de colher características relevantes às perdas. Antecipadamente ao cálculo do coeficiente de correlação de Pearson, foram aplicados teste Kolmogorov-Smirnov (K-S) com a finalidade de atestar que as variáveis estão normalmente distribuídas, ao nível de significância α de 5% para o limite p-valor, e número de amostra (n) igual a 45. Neste ponto será observada e tratada, quando necessário, a presença de *outliers*.

Dentre as informações adquiridas no levantamento em campo, alguns dados merecem destaque para ampla contextualização do cenário analisado no ano de 2021. Nas regiões avaliadas os índices de perdas superam 20%, com média de consumidores padronizados aquém dos 70%, e número de unidades conectadas diretamente a rede sem medição (auto religadas ou clandestinas) em taxa superior a 10% do total de conexões. Também, nestes circuitos foi identificado um número significativo de unidades com medição interna ou com defeito no medidor.

Na avaliação das relações entre as variáveis, através do teste de correlação de Pearson, foi constado uma forte correlação entre o percentual de redução de perdas e a porcentagem de perdas antes da aplicação das ações de combate a PNT (r = 0,923987). Este apontamento sugere que quanto maior a taxa de perda do circuito, maior será a redução (como intuitivamente esperado). Ainda dentro do contexto, destaca-se a correlação moderada (r = 0,676776) entre o número de religações realizadas nos circuitos e a taxa de perda após as intervenções, enfatizando a importância da negociação de dívidas para o processo de religação, o que significa conter o consumo irregular de energia. Outras questões também levantadas são as correlações moderadas entre a substituição de medidores e execução de serviços de blindagem (r = 0,668840), e realização de externalização da medição (r = 0,691469), destacando a necessidade de atuação associada para estas medidas.

Na análise das variáveis que representam o estado atual dos circuitos, o teste de correlação aplicado, apresentaram coeficientes inferiores a 0,5 entre a taxa de perda atual e número de irregularidades (clandestinos, autoreligados, medição interna e medidores danificados), indicando uma correlação fraca. Os coeficientes de correlação entre a taxa de perda atual e cada variável podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1 - Coeficientes de correlação de Pearson entre a taxa de perda atual e outras variáveis.

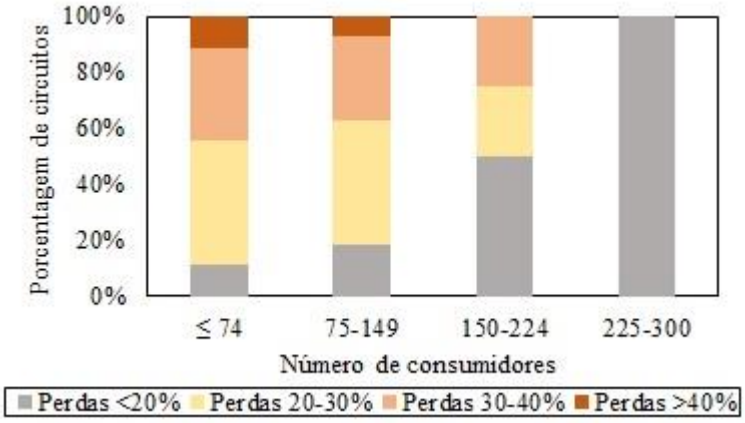
Variável	**Coeficiente (*r*)**	**Classificação**
Clandestinos	0,195260	Insignificante
Autoreligados	0,401207	Fraca
Medições internas	0,258365	Insignificante
Medidores danificados	0,279925	Fraca

Fonte: autoria própria.

Dessa forma, conclui-se que não há uma anomalia preponderante correlacionada diretamente com o percentual de perdas, o que reforça a necessidade de associar ações, para de fato alcançar o controle sobre as perdas comercias de energia elétrica.

A partir do cruzamento de dados e representações gráficas, obtiveram-se relações capazes de extrair os atributos mais significativos para as perdas nestas localidades. Os resultados indicam, dentre outros achados, que quanto maior o número de consumidores do circuito menor o índice de perda, como observado no Gráfico 1.

Gráfico 1 - Percentual de circuitos por faixa de perdas considerando o número de consumidores.



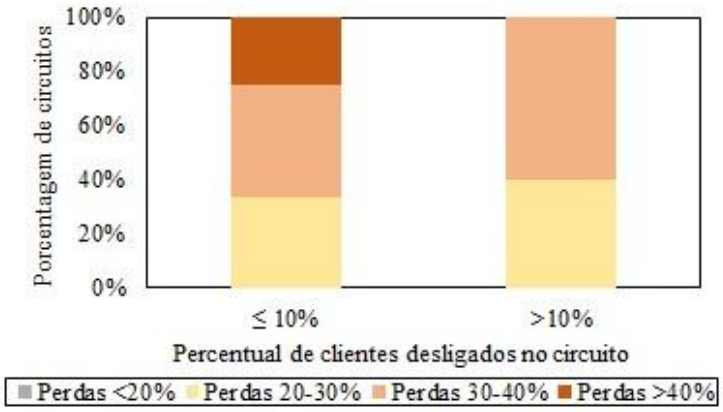
Fonte: autoria própria.

Esta relação também é válida quando observamos apenas o número de consumidores padronizados (clientes regulares com medição padronizada) por circuito.

Foi ainda observado que 82% dos circuitos centralizados (localizado na zona central dos bairros) possuem perdas inferior a 30%, enquanto 64% dos periféricos (situado na parte limítrofe) têm perdas superiores a 30%, indicando a região que concentra os maiores índices de perdas.

Nos circuitos limítrofes, a relação entre o percentual de cliente desligados e o percentual de perdas do circuito merece destaque. Neste caso, quanto menor a percentagem de clientes inadimplentes efetivamente desligados, maior a percentagem de consumidores autoreligados, consequentemente maior o percentual de circuitos com altas taxas de perdas. Esta informação revela o quanto a presença de unidades desligadas nesta região pode influenciar na taxa de PNT. No Gráfico 2 esta comparação é apresentada.

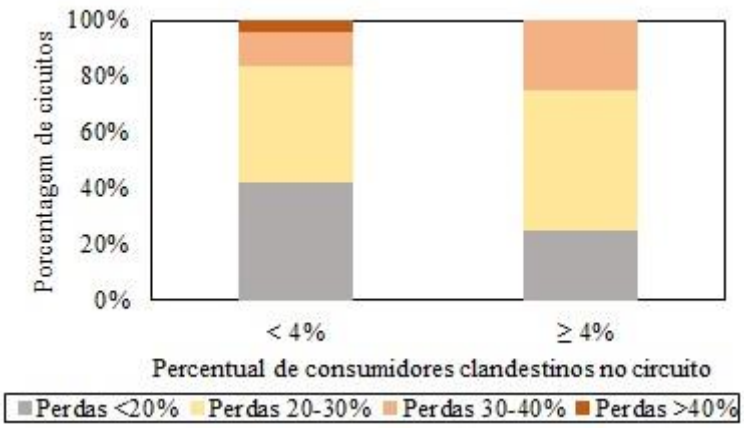
Gráfico 2 - Percentual de circuitos por faixa de perdas, considerando o percentual de consumidores clandestinos na região limítrofe.



Fonte: autoria própria.

Em circuitos localizados na região central, o destaque está para a associação entre o número de ligações clandestinas e o percentual de perdas comerciais, revelando que quanto maior o percentual de clandestinos maior o percentual de circuitos com altas taxas de perdas, como observado na Gráfico 3.

Gráfico 3 - Percentual de circuitos por faixa de perdas, considerando o percentual de consumidores



Fonte: autoria própria (2022)

Também na comparação das taxas de irregularidades entre regiões, observa-se que os percentuais atribuídos a conexões ilegais, cliente auto-religado, medição interna, medidor danificado e ligação clandestina, são maiores em circuitos de distribuição elétrica limítrofes. Por sua vez, o estoque de unidades consumidoras desligadas é maior em circuitos centrais, o que sugere que nesta região há uma inibição natural da ocorrência de auto religação do cliente. As taxas para cada região são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Porcentagem de irregularidades por tipo e região

Tipo	**Região**	
	Central	***Limítrofe***
Postes com conexões irregulares	25%	38%
Desligados	8%	7%
Auto-religados	4%	7%
Medições internas	5%	6%
Medidores danificados	5%	8%
Clandestinos	2%	4%

Fonte: autoria própria.

Por fim, constata-se que a percentagem de anomalias tende a diminuir sistematicamente dentro de um período de 6 a 11 anos após aplicação de medidas de combate e prevenção a perdas. As taxas são comparadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Porcentagem de irregularidades por tipo e faixa etária de intervenções

Tipo	**Faixa etária**		
	6 a 7 anos	***8 a 9 anos***	***10 a 11 anos***
Postes com conexões irregulares	38%	26%	25%
Desligados	10%	8%	4%
Auto-religados	4%	4%	2%
Medições internas	7%	6%	3%
Medidores danificados	6%	5%	6%
Clandestinos	5%	3%	1%

Fonte: autoria própria.

Dessa forma, os percentuais referentes ao número de estruturas com conexões ilegais, estoque de desligados, auto-religados, medidor interno e clandestino, decaem no período do sexto ao décimo primeiro ano após as medidas estruturantes serem aplicadas de maneira coordenadas para o combate a perdas comerciais, independente da região em que está situado o circuito. Embora esse efeito possa ser creditado às ações de combate a PNT, a educação do consumidor também pode ter um papel importante. Outro indicador relevante refere-se ao percentual de clientes com medidores danificados que se mantém estável ao longo dos anos, fazendo com que seja necessária a aplicação recorrente da medida de substituição de medidor.

As conclusões indicam que não há uma anomalia preponderante correlacionada diretamente com o percentual de perdas, o que reforça a necessidade de combinar ações para de fato alcançar o controle sobre as perdas comerciais de energia.

Diante da necessidade de associar medidas, superar limitações operacionais, otimizar a aplicação de recursos financeiros, e acelerar resultados, manifesta a importância de avaliação das medidas. Neste sentido, um modelo de avaliação robusto, capaz de colocar em ordenação as intervenções a serem priorizadas promoverá o aprimoramento do processo de decisão. Além do mais, o conhecimento sobre a anatomia das PNT em circuitos de distribuição elétrica, a partir de dados reais legitima o contexto do problema em questão, e fornece informações a serem utilizados na aplicação do modelo.