

**PAULO ANDRÉ SEHN DA SILVA**

**METODOLOGIA PARA TOMADA DE DECISÃO MULTICRITERIAL NO PROCESSO  
DE RESTABELECIMENTO AUTOMÁTICO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como parte das atividades para obtenção do título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Campus Alegrete da Fundação Universidade Federal do Pampa, área de concentração Sistemas de Potência.



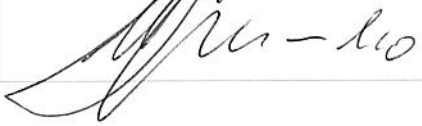
Orientador: Daniel Pinheiro Bernardon

**ALEGRETE  
2011**

**Autoria:** Paulo André Sehn da Silva

**Título:** Metodologia para Tomada de Decisão Multicriterial no Processo de Restabelecimento Automático de Energia Elétrica

Trabalho de conclusão de curso apresentado como parte das atividades para obtenção do título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Campus Alegrete da Fundação Universidade Federal do Pampa, área de concentração Sistemas de Potência.

<b>Os componentes da banca de avaliação, abaixo listados, consideram este trabalho aprovado.</b>				
	<b>Nome</b>	<b>Titulação</b>	<b>Assinatura</b>	<b>Instituição</b>
<b>1</b>	Daniel Pinheiro Bernardorn	Dr.		UNIPAMPA
<b>2</b>	Luciano Lopes Pfitscher	Me.		UNIPAMPA
<b>3</b>	Mauricio Sperandio	Dr.		UNIPAMPA

**Data da aprovação:** 22 de junho de 2011.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a toda equipe de professores e funcionários da Unipampa pela luta constante para oferecer um ensino de qualidade a todos os alunos.

Agradeço ao professor Daniel Bernardon pela orientação acadêmica prestada ao longo de dois anos e pelas oportunidades de aprendizado ofertadas a mim.

Agradeço ao Wagner Reck pela ajuda na construção dos resultados deste TCC e pela disponibilidade e esforço nas publicações.

Agradeço a toda equipe do Grupo de Energia e Sistemas elétricos de Potência (GESEP) pela união e colaboração coletiva na publicação dos trabalhos desenvolvidos, em especial o Carlos Vinicius e a Ana Paula.

*Se você quer ser bem sucedido, precisa ter dedicação total, buscar seu último limite e dar o melhor de si.*

*Ayrton Senna*

## RESUMO

A continuidade do fornecimento de energia elétrica tem sido uma preocupação constante para as empresas do setor elétrico brasileiro. Vinculado a uma forte regulamentação, as concessionárias de energia investem em novas tecnologias para minimizar o impacto causado pela interrupção de energia. As situações de contingência afetam diretamente a continuidade do fornecimento de eletricidade, tornando-se necessário desenvolver metodologias para minimizar o impacto causado por essas situações. Desta forma, as concessionárias de energia vêm empregando esforços para automatizar as redes de distribuição a fim de restabelecer energia de forma mais ágil, resultando em melhores índices de continuidade e aumento da satisfação dos consumidores. Neste contexto, o objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia para melhorar o desempenho da restauração da energia em situações de contingência. Para isso, busca-se minimizar o número de consumidores afetados, a energia não suprida e o tempo para a restauração do sistema. Para encontrar a melhor opção para a restauração do sistema, será utilizada a análise de tomada de decisão multicriterial, desta forma serão estudados, neste trabalho, dois métodos de análise e otimização multicriterial. O primeiro é o algoritmo AHP – *Analytic Hierarchy Process*, o qual fará a mensuração e qualificação das estimativas dos especialistas, definindo o grau de importância de cada critério. Para definir o ranque das melhores soluções é utilizado o método *Bellman-Zadeh*, que, usando lógica *fuzzy*, determina a melhor candidata para solução do problema. A eficácia do algoritmo proposto é demonstrada com o estudo de caso envolvendo o sistema real da concessionária.

Palavras-chave: restabelecimento da energia, redes de distribuição, multicritérios, AHP, *Bellman-Zadeh*, chaves telecomandadas.

## ABSTRACT

The continuity of electric energy supply has been a constant concern for companies in the Brazilian electricity sector. Bound to a strong regulation, the power utilities invest in new technologies to minimize the impact caused by power outages. The contingency situations directly affect the continuity of supply of electricity, making it necessary to develop methodologies to minimize the impact caused by these situations. In this way, the power utilities have been employing efforts for the automation of distribution networks in order to reestablish power in a more agile way, resulting in better indexes of continuity and increased consumer satisfaction. In this context, the objective of this work is to develop a methodology to improve the performance of the restoration of energy in contingency conditions. For this, we seek to minimize the impact of the number of consumers affected, the unserved energy and time to system restoration. To find the best option for the power restoration will be used the analysis multicriteria decision making. In this way will be used in this work two methods of analysis and multicriteria optimization. The first is the algorithm AHP - Analytic Hierarchy Process, which will make the measurement and qualification of the estimate of experts, defining the degree of importance of each criterion. To set the ranking of the best solutions is used the method *Bellman-Zadeh* which, using the fuzzy logic, determines the best candidate to solve the problem. The effectiveness of the proposed algorithm is demonstrated with a case study involving the utility actual system.

Index Terms: energy supply reestablishment, distribution network, multicriteria, AHP, Bellman-Zadeh, remote-controlled switches.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Topologia da rede piloto da concessionária AES SUL.....	32
Figura 2 – Esquemático das etapas para o restabelecimento automático da energia. ....	33
Figura 3 - Arquitetura para a comunicação e tratamento dos dados utilizados para o restabelecimento automático da energia.....	33
Figura 4 – Tela de supervisão de equipamentos de proteção em uma subestação de energia da AES Sul. ....	34
Figura 5 – Tela de monitoramento e comando de uma chave telecomandada da AES SUL. ..	35
Figura 6 – Exemplo de topologia de rede de distribuição. ....	35
Figura 7 – Intersecção das funções pertinência e a representação da melhor solução. ....	42
Figura 8 – Estrutura de três níveis para análise hierárquica. ....	44
Figura 9 – Programa para a realização da comparação par a par. ....	46
Figura 10 – Comparação par a par julgada pelo especialista 1. ....	56
Figura 11 – Comparação par a par julgada pelo especialista 2. ....	57
Figura 12 – Comparação par a par julgada pelo especialista 3. ....	58
Figura 13 – Topologia de rede utilizada para a demonstração da metodologia. ....	62
Figura 14 – Topologia da rede pertencente à AES Sul com a localização das chaves telecomandadas.....	65
Figura 15 – Diagrama unifilar da topologia de rede mostrada na Figura 14.....	66
Figura 16 – Divisão da rede de distribuição em estudo dividida por áreas. ....	67
Figura 17 – topologia da rede distribuição antes (esquerda) e depois (direita) do restabelecimento da energia.....	70
Figura 18 – Rede de distribuição dividida em áreas para a análise teórica da solução. ....	72
Figura 19 – Topologia da rede de distribuição antes (esquerda) e depois (direita) da aplicação da opção 7 para o restabelecimento da energia.. ....	74

Figura 20–Topologia da rede em estudo antes e depois da aplicação da metodologia para opção 2 de restabelecimento da energia.. .....	76
Figura 21 – Topologia da rede antes (esquerda) e depois (direita) da aplicação da opção 1 no restabelecimento da energia.....	77
Figura 22 – Topologia da rede de distribuição antes (esquerda) e depois (direita) do restabelecimento da energia utilizando a opção 3. ....	79



## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 Sinalização dos equipamentos telecomandados de acordo com a área afetada. ....	36
TABELA 2 Opções de restabelecimento da energia para a rede mostrada na Figura 6.....	36
TABELA 3 Escala numérica para comparações e julgamentos. ....	45
TABELA 4 Relação do número de critério com o índice randômico. ....	52
TABELA 5 Relação do número de critérios com o valor máximo de <i>RC</i> . ....	53
TABELA 6 Opções de restabelecimento da energia para a rede mostrada na Figura 6.....	61
TABELA 7 Valores das funções objetivo para o exemplo de restabelecimento da energia. ...	62
TABELA 8 Funções pertinência obtidas das funções objetivo, mostradas na TABELA 7. ....	63
TABELA 9 Mínimos valores das funções pertinência e destaque da melhor solução.....	64
TABELA 10 Número de consumidores e carga da rede mostrada na Figura 16. ....	67
TABELA 11 Opções de restabelecimento da energia para rede mostrada na Figura 14, supondo um defeito no disjuntor do alimentador EST – 3.....	67
TABELA 12 Valores das funções objetivo para as opções de restabelecimento mostradas na TABELA 11. ....	68
TABELA 13 Valor de carregamento dos alimentadores SPC – 3 e GRA – 212. ....	68
TABELA 14 Novos valores de carregamento dos alimentadores SPC – 3 e GRA – 212 após assumir a carga transferida. ....	68
TABELA 15 Valores das funções pertinência referente às funções objetivo mostrado na TABELA 12. ....	69
TABELA 16 Hierarquia das candidatas à solução. ....	70
TABELA 17 Redução do impacto da contingência com a aplicação da metodologia proposta. ....	71
TABELA 18 Carga e número de consumidores da nova característica da rede.....	71
TABELA 19 Opções para o restabelecimento da energia para análise da metodologia. ....	72

TABELA 20 Valores das funções objetivo para as opções de restabelecimento mostradas na TABELA 19. ....	72
TABELA 21 Carregamento dos alimentadores envolvidos no restabelecimento da energia...	73
TABELA 22 Valores das funções pertinência para as funções objetivo da TABELA 11. ....	73
TABELA 23 Hierarquia das candidatas a solução. ....	74
TABELA 24 Cálculo do desempate das opções 2 e 5. ....	74
TABELA 25 Redução do impacto da contingência com a escolha da opção 5. ....	75
TABELA 26 Funções pertinência sem considerar a opinião de especialistas.....	75
TABELA 27 Hierarquia das soluções sem considerar a opinião dos especialistas.....	75
TABELA 28 Redução do impacto da contingência com a utilização da opção 2.....	76
TABELA 29 Funções pertinência considerando apenas o critério: energia restabelecida.....	76
TABELA 30 Hierarquia das soluções considerando apenas o critério de energia restabelecida. ....	77
TABELA 31 Redução do impacto da contingência para opção de restabelecimento 1.....	77
TABELA 32 Funções pertinência considerando apenas a função objetivo: chaves comutadas. ....	78
TABELA 33 Hierarquia das soluções considerando apenas o critério de comutação de chaves. ....	78
TABELA 34 Determinação do valor de desempate para opções 1, 2 e 3. ....	78
TABELA 35 Redução do impacto da contingência para opção de restabelecimento 3.....	79
TABELA 36 Funções pertinência considerando apenas a função objetivo: consumidores interrompidos.....	79
TABELA 37 Hierarquia das soluções considerando apenas o critério de consumidores interrompidos.....	79
TABELA 38 Determinação do valor de desempate para opções 2 e 5. ....	80
TABELA 39 Comparação das soluções analisando a importância de cada critério. ....	80

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 Comparação de resultados dos autovetores para os três métodos de cálculo apresentados.....	50
QUADRO 2 Matriz de comparações, autovetor e máximo autovalor referentes a estimativa do especialista 1.....	56
QUADRO 3 Valores de <i>IC</i> , <i>RC</i> e análise da consistência par aos julgamentos do especialista 1.....	56
QUADRO 4 Matriz de comparações, autovetor e máximo autovalor referentes a estimativa do especialista 2.....	57
QUADRO 5 Valores de <i>IC</i> , <i>RC</i> e análise da consistência par aos julgamentos do especialista 2.....	57
QUADRO 6 Matriz de comparações, autovetor e máximo autovalor referentes a estimativa do especialista 3.....	58
QUADRO 7 Valores de <i>IC</i> , <i>RC</i> e análise da consistência par aos julgamentos do especialista 3.....	58
QUADRO 8 Matriz de comparações, autovetor e máximo autovalor referentes à integralização da estimativa dos três especialistas avaliados.....	59
QUADRO 9 Valores de <i>IC</i> , <i>RC</i> e análise da consistência para a matriz integralizada.....	59
QUADRO 10 Cálculo das funções pertinência para as funções objetivo mostrado na TABELA 12.....	69
QUADRO 11 Cálculo das funções pertinência para as funções objetivo mostrado na TABELA 20.....	73

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AES SUL – AES Sul Distribuidora Gaúcha de Energia S.A

AHP – Analytic Hierarchy Process

ANEEL – Agencia Nacional de Energia Elétrica

ANP – *Analytic Network Process*

CEEE – Companhia Estadual de Energia Elétrica

DEC – Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora

DIC – Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora

DMIC – Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade

FCE – *fuzzy cause-effect*

FDA – *Fuzzy Decision Approach*

FEC – Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora,

FIC – Frequência de Interrupção individual por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão

GPRS – *General Packet Radio Service*

H-EPN – *Hierarchical Time-Extended Petri Net*

MACBETH – *Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*

NA – Normalmente Aberta

NF – Normalmente Fechada

P&D – Pesquisa e Desenvolvimento

RGE – Rio Grande Energia

SCADA – *Supervisory Control and Data Acquisition*

TCC – Trabalho de Conclusão de Curso

TOPSIS – *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*

## LISTA DE SÍMBOLOS

$F_{sobrecarga}$  – Fator de sobrecarga permitido

$I_i$  – Corrente no ramo  $i$

$I_{imax}$  – Corrente máxima admissível no ramo  $i$

$V_j$  – Módulo da tensão no nó  $j$

$V_{jmin}$  – Módulo da tensão mínima aceitável no nó  $j$

$V_{jmax}$  – Módulo da tensão máxima aceitável no nó  $j$

$x$  – Elemento pertencente ao conjunto *fuzzy*

$F_p(x)$  – Função objetivo

$D(x)$  – Intersecção dos conjuntos *fuzzy*

$A_p$  – Conjuntos *fuzzy*

$\mu_p(x)$  – Função de pertinência de  $A_p$

$L$  – Área de soluções permissíveis

$p$  – Subíndice referente à função objetivo, pertinência

$q$  – Número total de funções objetivo

$X^O$  – Solução ótima

$\lambda_p$  – Representa o peso do critério  $p$

$A$  – Matriz de comparações

$a_{ij}$  – Elemento pertencente linha  $i$  e coluna  $j$  da matriz de comparações  $A$ .

$I$  – Subíndice referente à linha da matriz  $A$

$J$  – Subíndice referente à coluna da matriz  $A$

$n$  – Número de critérios

$w_{ij}$  – Valor atribuído ao critério na comparação par a par

$C_i$  – Critério da linha  $i$  da matriz de comparações  $A$

$C_j$  – Critério da coluna  $j$  da matriz de comparações  $A$

$W$  – Matriz consistente

$W_i$  – Elemento da Linha  $i$  pertencente à matriz consistente  $W$

$W_j$  – Elemento da Coluna  $j$  pertencente à matriz consistente  $W$

$E$  – Perturbação da matriz consistente

$\varepsilon_{ij}$  – Perturbação do elemento da linha  $i$  e coluna  $j$  da matriz consistente

$\lambda_{m\acute{a}x}$  – Máximo autovalor da matriz de comparações  $A$

$v$  – Autovetor associado ao  $\lambda_{m\acute{a}x}$  da matriz de comparações  $A$

$P_k$  – ndice de prioridade do critério  $k$

$k$  – Subíndice referente ao grau de importância do critério;

$\lambda_k$  – Autovetor do critério  $k$

$IC$  – ndice de inconsistência

$IR$  – ndice randômico

$RC$  – Razão de inconsistência

$\bar{A}_{ij}$  – Valor integralizado dos elementos  $a_{ij}$

$a_{ij_e}$  – Elemento da linha  $i$  e da coluna  $j$  da matriz de comparações do especialista  $e$

$e$  – Subíndice referente ao numero de especialistas

$n_e$  – Número de especialistas envolvidos

$\bar{A}$  – Matriz de comparações integralizada

$\bar{P}$  – ndice de prioridade integralizado

$\bar{\lambda}_{m\acute{a}x}$  – Máximo autovalor integralizado

$op$  – Número de candidatas a soluço do problema

## SUMÁRIO

<b>Agradecimentos</b> .....	<b>3</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>5</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>6</b>
<b>Lista de Figuras</b> .....	<b>7</b>
<b>Lista de tabelas</b> .....	<b>9</b>
<b>Lista de Quadros</b> .....	<b>11</b>
<b>Lista de abreviaturas e siglas</b> .....	<b>12</b>
<b>Lista de símbolos</b> .....	<b>13</b>
<b>Sumário</b> .....	<b>15</b>
<b>1 Introdução</b> .....	<b>17</b>
1.1 <i>Objetivos do TCC</i> .....	19
1.2 <i>Organização dos capítulos</i> .....	20
<b>2 Revisão Bibliográfica</b> .....	<b>22</b>
<b>3 Restabelecimento Automático da Energia</b> .....	<b>30</b>
3.1 <i>Formulação do Problema</i> .....	31
3.2 <i>Funções Objetivo e Restrições</i> .....	37
<b>4 Análise Multicriterial</b> .....	<b>40</b>
4.1 <i>Algoritmo de Tomada de decisão Multicriterial “Bellman-Zadeh”</i> .....	41
4.2 <i>Analytic Hierarchy Process (AHP)</i> .....	44
4.2.1 <i>Formalização do problema</i> .....	44
4.2.2 <i>Julgamentos</i> .....	45
4.2.3 <i>Construção da matriz de prioridades</i> .....	46
4.2.4 <i>Determinação da solução</i> .....	48
4.2.4.1 <i>Solução Calculada</i> .....	48
4.2.4.2 <i>Solução Simplificada</i> .....	49
4.2.5 <i>Medida de Inconsistência</i> .....	51
4.2.6 <i>Integralização de resultados</i> .....	53
<b>5 Metodologia Proposta</b> .....	<b>55</b>
5.1 <i>Estimativa de especialistas</i> .....	55
5.1.1 <i>Especialista 1</i> .....	56
5.1.2 <i>Estimativa 2</i> .....	57
5.1.3 <i>Estimativa 3</i> .....	58
5.1.4 <i>Integralização dos Resultados</i> .....	59

5.2	<i>Formulação das funções pertinência</i>	60
5.3	<i>Critério de desempate</i>	60
5.4	<i>Aplicação da metodologia</i>	61
<b>6</b>	<b>Resultados</b>	<b>65</b>
6.1	<i>Análise teórica da tomada de decisão multicriterial</i>	71
6.2	<i>Análise teórica sem considerar a opinião de especialistas</i>	75
6.3	<i>Análise teórica considerando apenas o critério de Energia Restabelecida</i>	76
6.4	<i>Análise considerando apenas número de chaves comutadas</i>	77
6.5	<i>Análise Teórica considerando apenas consumidores interrompidos</i>	79
	<b>Considerações finais</b>	<b>81</b>
	<b>Referências bibliográficas</b>	<b>84</b>
	<b>Apêndice I</b> Diagrama Unifilar das chaves Telecomandadas instaladas na rede de distribuição de energia da concessionária AES SUL.	<b>88</b>
	<b>Apêndice II</b> Código em MATLAB® para obtenção dos valores dos índices de prioridade dos critérios a partir da comparação par a par.	<b>89</b>



## 1 INTRODUÇÃO

A modernização do sistema elétrico brasileiro vem sendo consolidada pelos esforços de garantir maior confiabilidade no fornecimento de energia elétrica aos consumidores. Em constante expansão, o sistema elétrico brasileiro enfrenta grandes desafios para assegurar o crescimento da demanda de energia elétrica aliado a uma maior qualidade do serviço prestado. Para tanto, as empresas do setor elétrico investem em modernas soluções para melhorar a monitoração e o controle dos sistemas de energia. Um dos fatores marcantes no setor elétrico brasileiro foram as privatizações, abrindo espaço aos investidores privados e assim, modificando o modelo de comercialização do serviço de energia elétrica no Brasil.

No Rio Grande do Sul até 1996 a concessão da distribuição da energia elétrica aos consumidores pertencia a CEEE – Companhia Estadual de Energia Elétrica. A partir daquele ano, o setor elétrico do estado foi privatizado, sendo os serviços de distribuição de energia elétrica divididos em três partes: uma sob a responsabilidade da CEEE e as outras duas assumidas pelas concessionárias, RGE – Rio Grande Energia e AES SUL – AES Sul Distribuidora Gaúcha de Energia S.A. A privatização do setor elétrico tornou a prestação deste serviço uma comercialização livre, e, em contrapartida, adotou-se uma forte regulamentação, fazendo com que as concessionárias utilizassem um modelo econômico mais dinâmico, orientadas por normas e metas regulamentadas.

Um dos motivos que levaram o setor elétrico brasileiro a adotar o novo modelo de mercado foi à escassez de recursos, governamental e privado, que impediram a conclusão de diversos empreendimentos, resultando no acúmulo de dívidas e a inviabilização de parcerias de empresas estatais com o capital privado (CHIGANER, 2002).

No Brasil, a regulação do sistema elétrico é realizada pela ANEEL – Agencia Nacional de Energia Elétrica, cabendo a ela determinar os padrões do fornecimento da energia elétrica aos consumidores. Estes padrões são fiscalizados com base em indicadores de continuidade

como, por exemplo, DEC – Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora, FEC – Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora, DIC – Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão, FIC – Frequência de Interrupção individual por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão e DMIC – Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora (ANEEL, 2010). Por parte das concessionárias de energia, o não cumprimento destes padrões acarreta em penalidades.

Para que as concessionárias não sofram as penalidades do não cumprimento das metas estabelecidas pela ANEEL faz-se necessário investir na melhoria do serviço prestado, fazendo com que as empresas de distribuição busquem alternativas cada vez mais sofisticadas na melhoria do controle e operação das redes de distribuição. Uma das alternativas para melhorar os índices de continuidade de energia é a minimização do tempo de restabelecimento de energia em situações de contingência.

As situações de contingência caracterizam-se como uma das principais causas dos baixos índices de continuidade de energia elétrica. Nestes casos, para cumprir os limites estabelecidos pela ANEEL, necessita-se agilizar a operação de restabelecimento da energia elétrica e minimizar a área afetada pelo defeito. Para isso, as empresas vêm investindo na modernização das redes de distribuição através da instalação de equipamentos de monitoração e controle a distância e a implementação de conceitos de redes inteligentes na operação do sistema.

Dentro das novas tecnologias que vêm sendo propostas, as redes auto-reconfiguráveis tem recebido grande atenção de empresas e instituições de ensino. Este conceito consiste em, na ocorrência de uma contingência, isolar o defeito, restabelecer a energia para o maior número de consumidores possíveis e, após a correção do defeito, retornar a configuração original da rede, sendo todas as etapas realizadas automaticamente em tempo real.

Neste cenário, é de grande relevância o desenvolvimento de uma metodologia para agilizar o restabelecimento da energia elétrica, bem como estratégias que levam em consideração a operação e monitoramento de equipamentos telecomandados instaladas na rede de distribuição.

Neste TCC – Trabalho de Conclusão de Curso, será utilizada a integração de dois algoritmos de tomada de decisão multicriterial para definir a melhor estratégia de restabelecimento da energia. O primeiro algoritmo é chamado de AHP – *Analytic Hierarchy Process* e fornecerá o grau de importância dos critérios avaliados no problema com base na opinião de es-

pecialistas. O segundo método, chamado *Bellman-Zadeh*, definirá a solução que melhor representa as funções objetivo do problema. Deste modo a integração destes dois métodos permite uma avaliação tanto qualitativa quanto quantitativa, agregando maior confiabilidade na tomada de decisão.

Este TCC é parte de um projeto de P&D – Pesquisa e Desenvolvimento, construído em conjunto com a AES SUL, intitulado de “Desenvolvimento de Sistemas inteligentes para Operação Automática de Equipamentos Telecomandados”. Este projeto tem como finalidade realizar o tratamento combinado das informações provenientes dos equipamentos em campo e de simulações computacionais para operar automaticamente chaves telecomandadas no restabelecimento da energia. Quando operando na rede da concessionária, o programa desenvolvido receberá as informações de equipamentos em campo, definirá a solução mais promissora e, através do sistema SCADA<sup>1</sup> - *Supervisory Control and Data Acquisition*, operará automaticamente as chaves telecomandadas instaladas nas redes de distribuição, para assim realizar o restabelecimento da energia.

Como contribuição, este TCC traz o tratamento combinado de algoritmos ainda não explorados neste tema, como é o caso do AHP aplicado em conjunto com o método de *Bellman-Zadeh* para o restabelecimento da energia elétrica.

Espera-se que este TCC contribua para trabalhos futuros, fornecendo embasamento para a construção de novas soluções na melhoria da operação e controle de sistemas de distribuição de energia.

## 1.1 Objetivos do TCC

Neste TCC propõe-se o desenvolvimento de uma metodologia direcionada ao restabelecimento da energia em situações de contingência, com a finalidade de alcançar melhores índices de continuidade de energia. Deste modo, definem-se os seguintes objetivos:

Objetivo geral: realizar o restabelecimento da energia de maneira mais ágil e confiável.

---

<sup>1</sup>SCADA é um sistema supervisor que permite o monitoramento e operação de sistemas reais através de equipamentos de aquisição de dados. Em geral, o SCADA permite automatizar a monitoração e controle dos processos industriais, efetuando coleta de dados em ambientes complexos, geralmente distantes geograficamente, e a apresentação dos estados do sistema de modo amigável para o operador (GONÇALVES, 2005).

Objetivos específicos: realizar a análise multicriterial das alternativas de restabelecimento, considerando a opinião de especialistas na área de distribuição de energia, para determinar a melhor solução para o problema.

Para agilizar o restabelecimento da energia é proposto a construção de um sistema computacional, nomeado de *ASE Restoration*, para realizar a operação automática dos equipamentos telecomandados instalados na rede de distribuição da concessionária. Já para agregar confiabilidade à tomada de decisão, empregam-se algoritmos de análise e tomada de decisão multicriterial para definir a melhor solução para o restabelecimento da energia.

Para alcançar os objetivos citados foram abordados os seguintes tópicos:

- 1) Avaliar as informações disponíveis na concessionária;
- 2) Algoritmo para determinar as opções de comutação de chaves para realizar o restabelecimento da energia;
- 3) Metodologia de análise multicriterial AHP para qualificar e estimar a opinião de especialistas;
- 4) Metodologia de tomada de decisão multicriterial *Bellman-Zadeh* para a definição da solução que melhor representa as funções objetivo no restabelecimento da energia;
- 5) Análise e conclusão da metodologia aplicada.

## 1.2 Organização dos capítulos

Este TCC foi dividido em seis capítulos. Distribuídos da seguinte forma:

No primeiro, apresentam-se informações conceituais a respeito de sistemas de potência, abordando temas como a mudança do modelo econômico do setor elétrico e a modernização das redes de energia com a utilização de equipamentos de monitoramento e comando a distância.

No segundo, realiza-se a apresentação do estudo de trabalhos publicados envolvendo os assuntos de restabelecimento da energia, algoritmos de tomada de decisão multicriterial e operação de equipamentos telecomandos.

No terceiro, é apresentada a metodologia de restabelecimento automático da energia, realizando a formulação do problema bem como a definição das funções objetivo e restrições para determinar a solução do problema de acordo com a característica da rede de distribuição da AES SUL.

No quarto, faz-se a apresentação dos métodos multicriteriais *Bellman-Zadeh* e AHP, abordando a justificativa, descrição da metodologia, e as características principais dos dois métodos.

No quinto, apresenta-se o desenvolvimento da utilização das duas metodologias combinadas, abordando a estimativa dos especialistas, os valores dos índices de prioridade de cada critério, a formulação das funções pertinência e a demonstração da metodologia aplicada a um exemplo.

No sexto, é realizado um estudo considerando uma contingência ocorrida na rede de distribuição da concessionária AES SUL, avaliando a redução do impacto da contingência para os consumidores. Também é apresentado um estudo de caso hipotético onde se avalia a importância de cada critério na tomada de decisão multicriterial.

Nas considerações finais, foram analisados os resultados do trabalho, as contribuições e os trabalhos publicados com a construção da metodologia.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para a construção deste trabalho foi necessário a pesquisa das técnicas utilizadas para o restabelecimento da energia em sistemas de distribuição bem como as metodologias utilizadas para a tomada de decisão na solução deste tipo de problema. Assim neste capítulo será apresentado o estado da arte das técnicas e algoritmos utilizados para a solução do problema de restabelecimento da energia. Em função da importância deste assunto para as concessionárias de energia elétrica, existem várias pesquisas referentes ao restabelecimento de energia elétrica, diferenciando em cada aplicação, porém poucas explorando o uso de equipamentos telecomandados.

Morelato et al. (1989) publicaram uma estratégia baseada em busca heurística para realizar o restabelecimento da energia. Basicamente o modelo consiste em realizar uma busca heurística em profundidade para determinar a melhor solução. Para tanto, dois tipos de funções objetivo foram utilizadas: restabelecer o serviço para os consumidores e realizar o balanço entre as cargas. Além das funções objetivo, foram consideradas três restrições: a configuração final da rede deve ser radial, a área não afetada pelo defeito deve ser restabelecida e devem ser obedecidos os limites de carregamento dos alimentadores. Em síntese o algoritmo testa, após o defeito na rede de distribuição ser isolado, todas as possibilidades de manobra e, com base nas funções objetivo e restrições, escolhe qual solução é a mais promissora. Resultados foram apresentados em um sistema de distribuição contendo 4 alimentadores, 20 barras e 33 chaves, obtendo uma solução satisfatória, na opinião do autor, à proposta do algoritmo.

Em (HSU et al., 1992) é apresentado um sistema computacional construído para operar na companhia de energia de Taiwan. Este sistema consiste em realizar uma busca heurística explorando as possibilidades de restabelecimento da energia. A proposta apresentada objetiva restabelecer a energia com os seguintes critérios: menor tempo possível, maior número de consumidores restabelecidos dentro da área afetada, menor número de chaves operadas, a configuração do sistema deve ser o mais próximo possível do sistema original, deve ser man-

tida a radialidade do sistema e nenhum componente pode operar com sobrecarga. A metodologia foi testada em um sistema real na cidade de Taipei, no norte de Taiwan.

Em (SHIRMOHAMMADI, 1992) é demonstrada uma aplicação diferenciada das técnicas de heurística apresentadas anteriormente, enquanto que outras técnicas realizam a busca baseada em funções analíticas ou no conhecimento de especialistas, esta metodologia consiste em modificar o estado das chaves instaladas na rede de distribuição até encontrar a solução mais promissora. De maneira geral, o algoritmo consiste em, após a ocorrência do defeito, fechar todas as chaves disponíveis no sistema, após isto abrir as chaves que isolam o defeito e as chaves que formam um circuito em anel. Em seguida é calculado o fluxo de potência da rede em malha e iniciada uma busca iterativa. Em cada iteração, o algoritmo abre uma chave, a qual é escolhida com base no impacto que a abertura desta chave causa ao sistema, e calcula o fluxo de potência para a nova configuração. A busca termina quando a rede se torna novamente radial. Após determinada a solução o programa retorna quais chaves devem ser operadas. Para guiar o algoritmo a solução desejada é definida as seguintes funções objetivo: a configuração da rede deve ser radial, o serviço deve ser restabelecido para todos os consumidores a jusante da área afetada, número de manobras de chaveamento deve estar dentro do especificado pelo operador, ampacidade e capacidade dos alimentadores não deve ser violados. O autor apresenta um teste em uma rede com 4 alimentadores 500 ramos e 50 chaves, encontrando a solução em um tempo de 6 segundos.

Em (MCDERMOTT et al., 1999) é realizada também uma busca heurística, porém após isolar o defeito o sistema computacional abre todas as chaves restantes e então cria uma lista de chaves candidatas. Esta lista contém as chaves que possuem tensão em apenas um dos lados e, a partir disto, é testada separadamente cada uma das chaves, calculando o fluxo de potência em cada interação. Depois de ter testado todas as chaves, se fecha a chave que obteve o melhor desempenho e cria-se uma nova lista para as chaves restantes. O desempenho de cada chave depende das perdas a ela agregada. O algoritmo para quando todas as chaves foram fechadas, sem violar as restrições de radialidade, corrente e tensão em todos os elementos da rede de distribuição e toda a carga seja restabelecida. Segundo o autor este algoritmo leva mais tempo computacional que outros métodos, porém modela as restrições e controla as ações com mais exatidão e segurança.

Em (HSIAO et al., 2000) é utilizada uma abordagem baseada no trabalho conjunto do método *fuzzy*<sup>2</sup> e algoritmo genético. A formulação do problema consiste em minimizar cinco funções objetivo: área afetada, número de operações de chaveamento, desvio da tensão padrão, corrente nas linhas e minimizar a carga nos transformadores. Como restrições: deve ser mantida a radialidade da rede e obedecida a sequência de chaveamento pré-definida. Inicialmente as funções objetivo são transformadas em conjuntos *fuzzy*, avaliando a natureza imprecisa das funções objetivo e em seguida é utilizado um algoritmo genético para realizar a otimização do problema. Para verificar os limites de tensão e corrente o autor apresenta um algoritmo para o cálculo do fluxo de potência. A metodologia é testada em um sistema real contendo 10 alimentadores, 102 ramos e 217 chaves, apresentando um tempo de processamento menor que 1 minuto.

Em (TOUNE, et al., 2002) foi apresentada uma comparação de quatro algoritmos heurísticos aplicados ao restabelecimento da energia. O objetivo desta comparação é avaliar o desempenho de cada método. Os algoritmos estudados pelo autor foram: algoritmo genético, *Parallel Simulated Annealing*, busca Tabu e busca Tabu reativa. Para isso, o problema foi formulado com base nas seguintes funções objetivo: contrabalancear a energia entre os alimentadores e minimizar a queda de tensão nas barras. Como restrições: a nova configuração do sistema deve ser radial, deve-se obedecer aos limites de capacidade de carga da rede, operar com tensão dentro dos limites preestabelecidos e a corrente não deve ultrapassar limite máximo permitido. Os algoritmos foram testados em um sistema com 3 alimentadores e 60 barras, tendo tempos computacionais de 15 segundos para Busca Tabu e Tabu Reativa, 150 segundos para algoritmos genéticos e 350 segundos para o *Parallel Simulated Annealing*. O autor destaca que o algoritmo de Busca Tabu reativa é o melhor método para ser utilizado no restabelecimento da energia, pois apresenta um tempo computacional aceitável e apresenta resultados mais qualificados que os demais algoritmos estudados.

Em (HUANG, 2003) foi utilizado um algoritmo chamado de Rede FCE – *fuzzy cause-effect* para resolver o problema de restabelecimento da energia, juntamente com este algoritmo foi utilizado o método AHP – *Alytical Hierarchy Process*, para definir o peso de cada objetivo na construção da solução. A solução apresentada pelo autor é guiada por quatro funções *fuzzy*: quantidade de energia restabelecida, número de chaves operadas, sobrecarga nos elementos da rede e variação de corrente nos dispositivos. Em síntese, após isolar o defeito o

---

<sup>2</sup> Conjuntos *fuzzy* são utilizados para modelar raciocínios imprecisos, tentando imitar a habilidade humana de tomar decisões racionais.



algoritmo testa todas as possíveis soluções de restabelecimento e fornece um valor a cada solução, este valor é calculado através da soma das funções *fuzzy* multiplicada pelo respectivo peso, obtido através do método AHP. A melhor solução é aquela que apresenta o maior valor.

Em (INAGAKI et al., 2006) é utilizada uma abordagem multiobjetivo utilizando algoritmos genéticos, juntamente com o método *Simulated annealing*, buscando, através destes algoritmos, a solução ótima de Pareto. O autor considerou duas funções objetivo: minimizar a área afetada pelo defeito e minimizar o número de chaves operadas. Como restrições, têm-se as seguintes: a rede de distribuição deve permanecer radial, áreas que não foram afetadas pelo defeito devem continuar com o suprimento de energia, devem ser respeitados os limites de corrente e carga nas redes e a variação da tensão deve respeitar os níveis permitidos. O autor apresentou resultados experimentais em um sistema composto de 6 alimentadores e 78 barras, obtendo um conjunto de solução pertencentes ao conjunto Pareto ótimo.

Em (KUMAR et al., 2008) o autor apresenta uma proposta nomeada de *No Dominated Sorting Genetic Algorithm -II* (NSGA-II avançado). Segundo o autor este algoritmo, em contraste com o algoritmo genético convencional, não exige fatores de ponderação para a conversão de um problema de otimização multiobjetivo em um problema de otimização equivalente com uma única função objetivo. Também destaca a utilização de fatores particulares a cada área, tais como a presença de clientes prioritários, a presença de equipamentos controlados remotamente e chaves de comando manual, por exemplo. As funções objetivo utilizadas foram: reduzir a área afetada, minimizar a operação de comutação das chaves (controladas remotamente e operadas manuais) e minimizar o carregamento das redes. Como restrições foram consideradas: manter a rede radial, obedecer aos limites de queda de tensão, não exceder os limites de carregamento da rede, priorizar o restabelecimento para cargas especiais, como hospitais e grandes centros industriais.

Em (COX, 2009) é proposto um algoritmo para restabelecimento da energia em tempo real, considerando a existência de equipamentos telecomandados instalados na rede. O autor divide o algoritmo em duas partes: na primeira é realizada a busca das informações dos equipamentos a serem manobrados, já na segunda parte é realizada a análise destes dados para realizar a localização da falta. Resumidamente, o algoritmo proposto pelo autor realiza os seguintes procedimentos: na ocorrência de um defeito o algoritmo percorre todos os elementos da rede a qual o disjuntor do alimentador foi desarmado; constrói um modelo de árvore simplificado da rede afetada; percorre os elementos da rede, a partir do alimentador, para encontrar os valores de carga e capacidade dos elementos; busca a chave mais a jusante do ali-

mentador que possui passagem de corrente de falta; abre a chave, se ainda não estiver aberta; religa o disjuntor do alimentador; encontra a chave a jusante do defeito e a deixa no estado aberto. Este processo é realizado de forma automática através do sistema SCADA utilizado pela concessionária.

Em (MACLEMAN et al., 2009) é apresentada uma aplicação comercial de um sistema para automatizar o restabelecimento da energia. O sistema é instalado na ilha *Wight*, Reino Unido, pela concessionária *Scottish and Southern Energy*, com início no ano de 2008. O sistema apresentado consiste da instalação de uma série de religadores “inteligentes”, estes religadores possuem um sistema que, quando desligados pela atuação da proteção, emitem um sinal de pulso para identificar se a falta está a jusante do equipamento e assim identificar a localização do defeito. O autor destaca a utilização do sistema *Intelle TEAM II*, o qual permite a interação com os diversos equipamentos da rede de distribuição (disjuntores, relés e religadores) e a comunicação com o sistema SCADA, possibilitando assim uma maior confiabilidade no restabelecimento da energia.

Em um artigo de Bingyin et al., (2010) é apresentado um estudo de algumas metodologias para o isolamento de um defeito e o restabelecimento da energia. Neste estudo destacam-se os seguintes métodos: método de religamento sucessivo, o qual consiste em modificar a configuração da rede afetada, através da comutação de chaves, para cada religamento do disjuntor; método de telecontrole: equipamentos em campo enviam informações de corrente pré-falta a uma central de operação e, baseado nestas informações é localizada a área onde o defeito ocorreu; *fast-self-healing*, além da existência de um centro de operação, os equipamentos em campo comunicam-se entre si, conseguindo realizar com maior agilidade a operação do sistema.

Em um recente trabalho de Babu et al., (2011) é proposto uma metodologia de busca heurística apresentando tanto as técnicas de busca em profundidade como em largura para determinar as soluções para o problema de restabelecimento de energia elétrica em sistemas de distribuição. Para alcançar uma reconfiguração ótima da rede afetada o autor considera os seguintes objetivos: a estrutura radial da rede deve ser mantida, nenhum alimentador deve ser deixado desligado, o restabelecimento deve ser feito sem exceder a capacidade do alimentador e as cargas dos alimentadores devem estar balanceadas. Para este último objetivo, o autor define um indicador chamado de *LDI*, para estimar o grau de balanceamento dos alimentadores. Os algoritmos propostos foram testados em três modelos de rede de distribuição da IEEE, contendo 3, 4 e 5 alimentadores. Foi apresentada uma comparação de quatro métodos: os dois

algoritmos propostos pelo autor, busca heurística em profundidade e largura, e dois outros métodos encontrados na literatura, (CIVANLAR et al., 2006) e (RAVIBABU et al., 2008). O autor destaca o algoritmo de busca em largura por apresentar um menor número de caminhos percorridos, melhor balanceamento de carga e pouca demanda computacional.

Em um trabalho de Liu et al., (2005) é utilizado um conjunto de três métodos para determinar uma solução para o problema de restabelecimento da energia. Para modelar o problema utilizou-se o método HT-EPN – *Hierarchical Time-Extended Petri Net*. Para guiar a solução, de acordo com as funções objetivo, foi utilizado o método heurístico de busca em profundidade e ainda, utilizou-se o método AHP para definir o grau de importância de cada regra e objetivo. Em síntese, o algoritmo busca através das redes de Petri, a melhor solução, porém para otimizar esta busca são utilizadas as técnicas de heurística para indicar o caminho mais promissor. A metodologia apresentada pelo autor é aplicada a sistemas de potência levando em consideração fatores como geração, transmissão e sincronismo de geradores.

Em um trabalho de Bernardon et al., (2010a) é apresentada uma metodologia para alocação de chaves telecomandadas em redes de distribuição de energia. Os autores apresentam uma metodologia que determina um ranque de melhores locais para a alocação de um par de chaves telecomandadas, uma normalmente fechada instalada no tronco da rede do alimentador e a outra normalmente aberta na fronteira com outro alimentador. Para determinar a localização das chaves consideram-se as seguintes funções objetivo: minimizar a valor do DEC, minimizar o valor do FEC e minimizar o valor de ENS. E define também as seguintes restrições: a rede deve permanecer radial, corrente deve estar dentro dos limites permitidos, a tensão de cada nó deve estar dentro do intervalo permitido. Em síntese, o algoritmo testa diversos pontos candidatos a receber o par de chaves telecomandadas, calculando os valores das funções objetivo e verificando a violação das restrições do problema. Com os valores das funções objetivo, é aplicado o algoritmo de tomada de decisão multicriterial, chamado de *Bellman-Zadeh*, o qual determina a solução mais promissora. Para verificar as restrições é implementado o cálculo do fluxo de potência na rede de distribuição. Este trabalho destaca-se pela contribuição na modernização das redes de distribuição, abrindo espaço a novas alternativas para operação destes equipamentos.

Em (ASR et al., 2008) o autor também apresenta um trabalho direcionado à alocação de chaves telecomandadas na rede de distribuição. Neste artigo, analisa-se o impacto financeiro que o número e a localização das chaves telecomandadas acarretam a concessionária. Para análise financeira, o autor considera a redução dos indicadores de continuidade, o investimen-

to inicial e o lucro em um período de 30 anos. Resumidamente, o algoritmo desenvolvido pelo autor encontra, primeiramente, a melhor localização para substituir uma única chave manual por uma telecomandada, sendo a localização desta chave escolhida pela melhor relação custo-benefício. Logo após, encontra-se a melhor localização para substituir outra chave manual e assim sucessivamente até alcançar o número de chaves definido pelo usuário do algoritmo. Como o maior número de chaves não representa financeiramente a melhor opção escolhe-se a substituição do número de chaves que apresentou a melhor relação de custo-benefício entre todas as opções calculadas. O autor apresenta o estudo da viabilidade da instalação de 1, 2, 3 e 4 chaves telecomandadas em uma rede de distribuição.

Como descrito nos trabalhos apresentados nesta revisão da literatura, o restabelecimento da energia se apresenta como um problema de análise multicriterial, sendo utilizadas diversas metodologias para a solução deste problema. Na avaliação de métodos multicriteriais, determinar qual melhor se aplica a solução do problema depende principalmente do grau de confiança que este método representa para a solução do problema. Um dos métodos mais utilizados e também mais simples na análise multicriterial é a soma ponderada (TRIANAPHYLLOU, 2000). Neste método a solução é encontrada através do valor máximo da soma do peso do critério multiplicado pelo valor normalizado do mesmo.

Em (ARANHA NETO, 2006) é realizada a otimização de investimentos na alocação de chaves telecomandadas na rede distribuição de energia. Para isso foi utilizado a metodologia multicriterial chamada de pontuação direta, onde o atribui-se diretamente os pesos aos critérios, definindo posteriormente a taxa de substituição (*trade-off*<sup>3</sup>). Para isto os decisores são questionados a expressar numericamente (entre zero e dez) a atratividade de cada critério em relação a escala de valores auferidos como bom, nota dez (melhor possível) e como neutro, nota zero. Para (ENSSLIN, 2001) este método apresenta vantagens como: rapidez na obtenção da função; a simplicidade do procedimento e a ausência de transformações matemáticas, porém com a desvantagem de gerar respostas que estejam em desacordo com a preferência do decisor.

Em (SALOMON, 1999) foi realizado o estudo comparativo de diversos métodos de análise hierárquica, utilizando como base um exemplo onde se deseja encontrar a melhor opção entre três alternativas, utilizando cinco critérios diferentes. As análises foram realizadas comparando o método AHP, formulado por Saaty (1977), com outros métodos encontrados com

---

<sup>3</sup> Representam a perda de desempenho que uma alternativa deve sofrer sobre o critério para compensar o ganho de desempenho em outro critério (SICA, 2003).

frequência na literatura. Os métodos utilizados no estudo comparativo foram o FDA – *Fuzzy Decision Approach* (LIANG, 1992), o ANP – *Analytic Network Process* desenvolvido por Saaty (1996), o método MACBETH - *Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique* (BANA E COSTA e VASNICK, 1994) e o método TOPSIS – *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (HWANG e YOON, 1981). O estudo apresentado pelo autor revela uma similaridade nas respostas obtidas, porém salienta as diversas vantagens que se obteve utilizando o método AHP, como por exemplo, forçar o decisor a pensar de maneira lógica (hierárquica) e verificar a inconsistência de seus julgamentos. O autor conclui recomendando a utilização do método AHP para casos onde o método é válido.

Apesar de haver várias pesquisas contemplando técnicas e metodologias para efetuar o restabelecimento da energia, poucas exploram o uso de equipamentos telecomandados. Assim o diferencial deste trabalho é a inclusão destes equipamentos na solução do problema, com a possibilidade do restabelecimento ser automático, propondo um novo método aplicado para sistemas reais de distribuição de energia elétrica.

### 3 RESTABELECIMENTO AUTOMÁTICO DA ENERGIA

As situações de contingência, em sistemas de distribuição, são uma das maiores preocupações para as concessionárias de energia. Este cenário agrega tal relevância por ser, na maioria das vezes, decorrente de fatores naturais como tempestades e descargas atmosféricas, sendo caracterizado como um evento imprevisível e, conseqüentemente, de difícil aferição. Como na maioria dos casos as situações de contingência afetam equipamentos de grande importância para o sistema, como por exemplo, disjuntores de alimentadores ou transformadores de distribuição, e, em alguns casos, a queda de postes de sustentação de condutores. Estes eventos ocasionam longos períodos de interrupção de energia aos consumidores, gerando penalizações para as concessionárias e insatisfação aos consumidores.

Em situações de contingência são adotadas medidas para minimizar a área afetada pelo defeito, como por exemplo, a manobra de chaves para transferir consumidores desenergizados para outro alimentador. Em geral podem-se adotar as seguintes medidas para minimizar a área afetada por uma contingência, conforme proposto em (BERNARDON, 2007): identificar o local onde o defeito ocorreu; isolar a menor parte possível do sistema através da abertura de chaves; manobrar as chaves para restabelecer o suprimento para os consumidores a jusante do bloco isolado; corrigir o problema; realizar novas manobras de chaves para retornar ao estado normal das redes.

De maneira manual, as etapas para restabelecer a energia dependem da agilidade das equipes de manutenção, as quais percorrem a rede desenergizada para encontrar a causa e o local da ocorrência do defeito e, após isto, identificar as chaves que devem ser comutadas para isolar o defeito e realizar as transferências de carga. Deste modo o tempo gasto para realizar o restabelecimento da energia torna-se bastante grande e oneroso para as concessionárias.

Para agilizar a operação de recomposição de um sistema após uma contingência vem sendo empregada novas alternativas para a modernização das redes de distribuição, destacando a

utilização de equipamento de monitoramento e comando a distância, bem como o emprego de sistemas computacionais voltados a soluções de problemas em tempo real.

Como para situações de contingência as ações devem ser realizadas no menor tempo possível, a modernização das redes de distribuição ganha uma grande motivação. Se considerarmos o restabelecimento da energia utilizando equipamentos telecomandados, a localização do defeito seria realizada através de informações enviadas por estes equipamentos instalados em campo e, manipulando adequadamente estas informações, podem-se determinar estratégias para minimizar o impacto da contingência na rede de distribuição, alcançando assim tempos de restabelecimento da energia menores que 1 minuto.

Neste contexto, propõe-se uma metodologia de tomada de decisão multicriterial para definir as estratégias de restabelecimento da energia através das informações de equipamentos telecomandados instalados em campo. A seguir, na seção 3.1, será apresentada o modelo utilizado para a construção da metodologia proposta.

### **3.1 Formulação do Problema**

A proposta apresentada neste TCC faz parte de um projeto de P&D construído em parceria com a concessionária de energia AES SUL intitulado de: “Desenvolvimento de Sistemas Inteligentes para Operação de Equipamentos Telecomandados”. Este P&D tem por finalidade a construção de um sistema computacional para automatizar a operação de chaves telecomandadas no restabelecimento da energia em situações de contingência. A relevância deste projeto consiste na operação em tempo real da recomposição do sistema afetado pelo defeito, bem como na verificação da viabilidade técnica das manobras através de simulações computacionais.

O projeto será aplicado a uma rede piloto da AES SUL localizada na região metropolitana da concessionária, contendo 21 alimentadores e 42 chaves telecomandadas espalhadas em 4 cidades do estado do Rio Grande do Sul: Gravataí, Esteio, São Leopoldo e Sapucaia do sul. Na Figura 1 é mostrada a topologia elétrica da rede piloto da concessionária AES Sul a qual será aplicada a metodologia apresentada neste TCC, e no Apêndice I tem-se o diagrama unifilar desta rede, contemplando apenas os equipamentos telecomandados instalados até o momento da construção deste TCC.

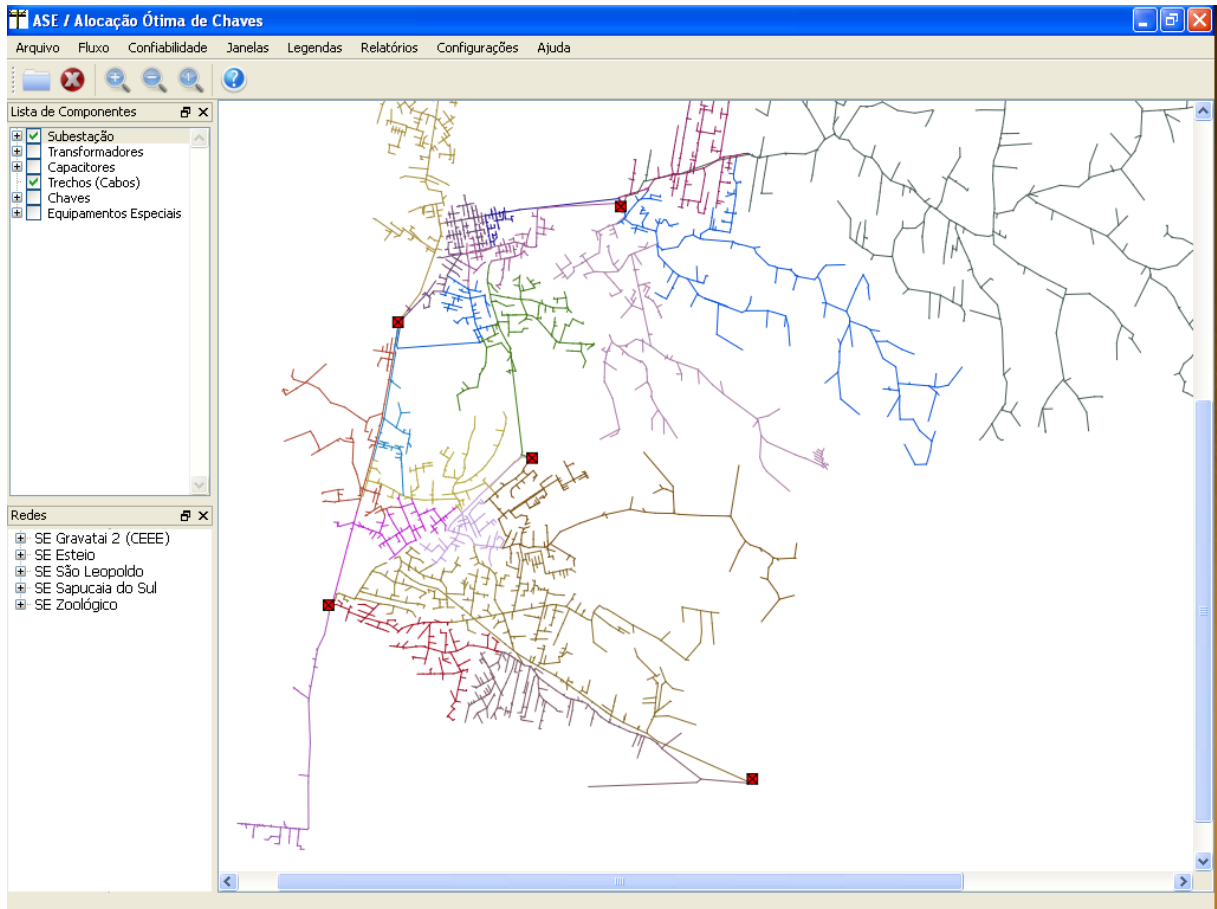


Figura 1 – Topologia da rede piloto da concessionária AES SUL.

De um modo geral, o projeto engloba diversas etapas de desenvolvimento, como a comunicação do sistema computacional desenvolvido com o sistema SCADA da concessionária, a construção de um algoritmo para determinar as candidatas à solução do problema, a análise multicriterial para determinar qual alternativa melhor representa a solução do problema e, finalmente, a simulação da nova configuração da rede para verificar a viabilidade das transferências de carga. Na Figura 2 é mostrado um esquemático onde são demonstradas, de maneira simplificada, as etapas construídas para o projeto.



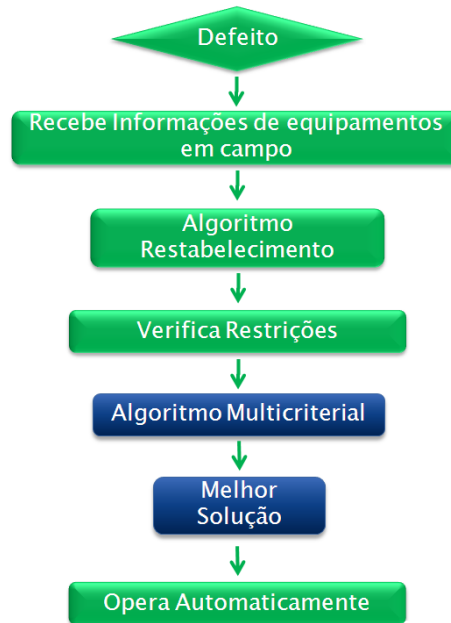


Figura 2 – Esquemático das etapas para o restabelecimento automático da energia.

Para realizar a automação da rede de distribuição, a concessionária AES Sul conta com uma arquitetura de monitoração e controle que envolve a comunicação dos equipamentos em campo com a central de operação, por meio do sistema SCADA. Para realizar a operação automática dos equipamentos telecomandados no restabelecimento da energia, conta-se com uma arquitetura onde a informação dos equipamentos em campo é enviada para o sistema SCADA, o qual informa ao *ASE Restoration* a ocorrência de um defeito na rede. O *ASE Restoration* processa as informações e define a melhor estratégia para sanar o defeito, enviando ao SCADA as informações de quais equipamentos devem ser operados e este efetiva as manobras para o restabelecimento da energia. Na Figura 3 é mostrada a arquitetura de comunicação e tratamento dos dados utilizados para o restabelecimento automático da energia.

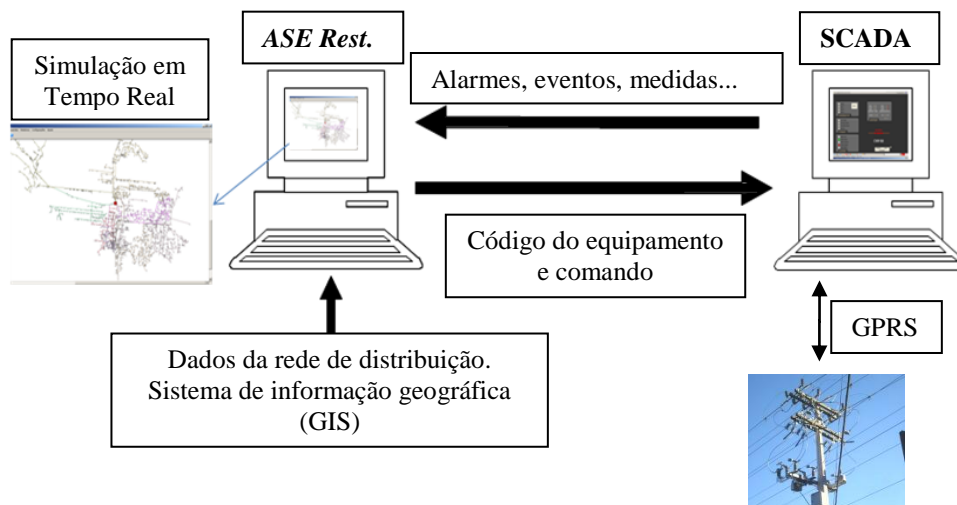


Figura 3 - Arquitetura para a comunicação e tratamento dos dados utilizados para o restabelecimento automático da energia.

Após a ocorrência de um defeito o sistema SCADA recebe as informações dos equipamentos telecomandados instalados em campo. Estes equipamentos mantêm comunicação constante, via sinal GPRS<sup>4</sup> – *General Packet Radio Service*, com o centro de operação da concessionária. Os dados destes equipamentos disponíveis são relativos a tensão, corrente, potência e sinalizadores de eventos.

Os disjuntores dos alimentadores possuem a sinalização de aberto ou fechado, bem como informações referentes a características elétrica deste equipamento (tensão, corrente e potência), assim quando o centro de operação da concessionária receber a informação que um disjuntor está no estado aberto, sabe-se que os consumidores alimentados por ele estão sem suprimento de energia e, provavelmente, há a ocorrência de um defeito neste alimentador. Através do sistema SCADA pode-se monitorar visualmente o estado destes equipamentos, como mostrado na Figura 4, onde se vê a tela de supervisão do SCADA utilizada para visualização das informações dos alarmes dos disjuntores na AES SUL.

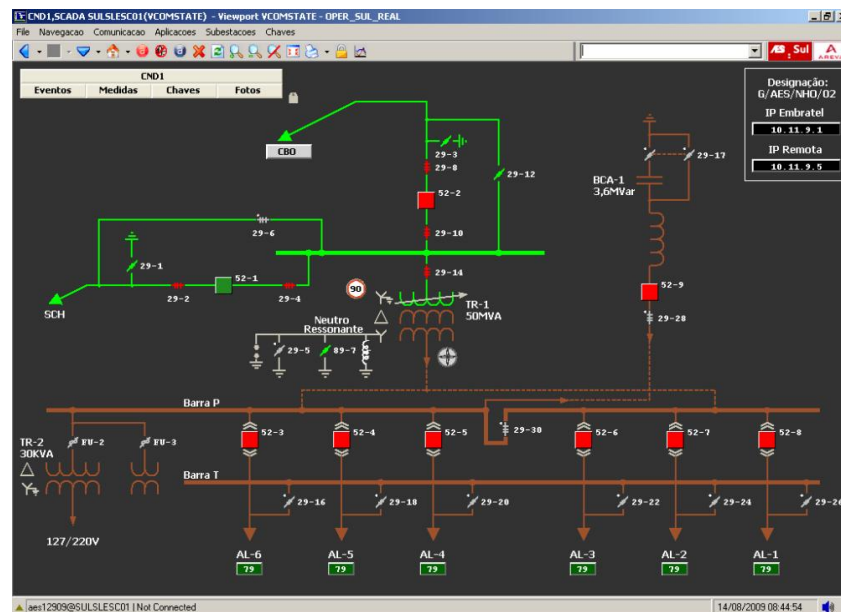


Figura 4 – Tela de supervisão de equipamentos de proteção em uma subestação de energia da AES Sul.

Do mesmo modo as chaves telecomandadas possuem a sinalização de eventos, porém a informação agregada diz respeito a corrente de falta. Quando uma chave telecomandada é percorrida pela corrente de falta, ou seja, o defeito ocorre à jusante da chave, o centro de operação recebe a sinalização desta chave, caso contrário nenhuma informação é enviada. Na

<sup>4</sup> Transmissão de pacotes de dados via internet por meio de um dispositivo móvel.

Figura 5 é mostrada a tela de operação e monitoração das chaves telecomandadas via SCA-DA.



Figura 5 – Tela de monitoramento e comando de uma chave telecomandada da AES SUL.

Através das informações conjuntas de sinalização de eventos do disjuntor do alimentador e das chaves telecomandadas é possível estimar a área onde ocorreu o defeito e, a partir disto, determinar uma solução para minimizar o impacto da interrupção.

Para demonstrar a identificação de um defeito através dos dados dos equipamentos telecomandados será considerado um exemplo utilizando a topologia de rede mostrada na Figura 6. Neste exemplo a rede é dividida em 3 áreas.

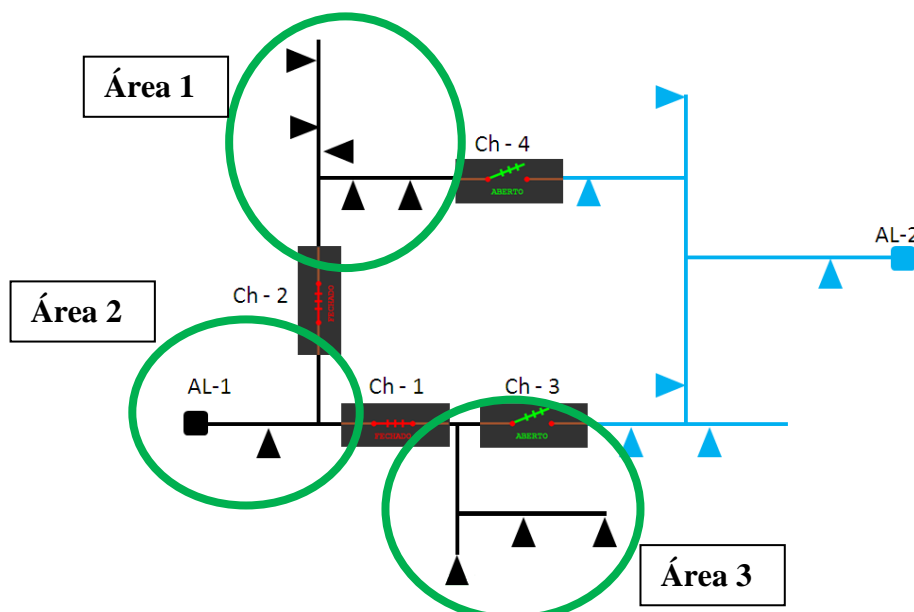


Figura 6 – Exemplo de topologia de rede de distribuição.

A rede mostrada na Figura 6 possui os seguintes equipamentos:

- AL-1 e AL-2: Disjuntores pertencentes aos alimentadores 1 e 2 respectivamente, ambos equipados com monitoração e comando remoto;
- Ch-1 e Ch-2: Chaves telecomandadas no estado Normalmente Fechado (NF);
- Ch-2 e Ch-3: Chaves telecomandadas de fronteira no estado Normalmente Aberta (NA).

Conforme a sinalização dos equipamentos em campo é possível saber o local onde o defeito ocorreu. Na TABELA 1 é mostrada a sinalização dos equipamentos telecomandados e a interpretação destas informações para identificar a área afetada pelo defeito.

TABELA 1  
Sinalização dos equipamentos telecomandados de acordo com a área afetada.

Área Afetada	Sinalização AL -1	Sinalização Ch-1	Sinalização Ch-2
1	Aberto	Sem sinalização	Sinalização
2	Aberto	Sem sinalização	Sem sinalização
3	Aberto	Sinalização de falta	Sem sinalização

Depois de recebidas as informações dos equipamentos em campo, o programa realizará a busca das possíveis manobras das chaves telecomandadas para o restabelecimento da energia. Para isto foi incorporado ao programa um algoritmo de restabelecimento da energia, que busca as diversas soluções existentes. Este programa encontra as soluções percorrendo os trechos de rede, a partir do alimentador, e verificando o estado dos equipamentos telecomandados. A descrição do funcionamento detalhado do algoritmo de restabelecimento da energia não será abordada neste trabalho por não ser o foco da construção do TCC, porém pode ser encontrado em (BERNARDON et al, 2010b).

A resposta do algoritmo de restabelecimento da energia é formada pelas candidatas a solução do problema. Como para grande parte dos casos de restabelecimento da energia existem mais de uma solução, é necessário determinar qual destas melhor representa a solução do problema. Para o exemplo da rede mostrada na Figura 6, o algoritmo de restabelecimento da energia identificaria as opções de restabelecimento mostradas na TABELA 2.

TABELA 2  
Opções de restabelecimento da energia para a rede mostrada na Figura 6.

Alternativa	Abre Chave	Fecha Chave
1	Ch-1	Ch-3
2	Ch-2	Ch-4
3	Ch-1 e Ch-2	Ch-3 e Ch-4

Após determinar as possíveis soluções, primeiramente, é realizada uma simulação para cada uma das manobras de recomposição do sistema. Nesta simulação calcula-se o fluxo de potência para cada alternativa de restabelecimento e verifica se existe ou não violação das restrições operativas da rede. Um dos diferenciais do cálculo do fluxo de potência utilizado neste projeto é o emprego do conceito de curvas típicas para contemplar o patamar de carga durante todos os horários do dia. Deste modo, a verificação das restrições pode variar de acordo com o horário que ocorre a contingência. Se alguma das restrições forem violadas a opção é descartada.

Após o algoritmo determinar as candidatas à solução que não violam as restrições, o próximo passo consiste em identificar a melhor solução entre as candidatas. Para avaliar e definir a melhor solução será empregado uma metodologia de tomada de decisão multicriterial.

Para a análise multicriterial foram utilizadas duas metodologias de tomada de decisão. O algoritmo de *Bellman-Zadeh* e método AHP. O desenvolvimento da metodologia de tomada de decisão multicriterial é o foco principal deste TCC e será abordada por completo no capítulo 3.

### **3.2 Funções Objetivo e Restrições**

Para que o processo de restabelecimento da energia se consolide de acordo com a necessidade da concessionária, devem-se definir funções objetivo que guiem a solução do problema para um nível satisfatório. A escolha de quais funções objetivo deve ser utilizada, depende da solução que se pretende alcançar. A intenção principal é restabelecer a energia para o maior número possível de clientes em um menor tempo possível.

Porém nem sempre o valor do número de consumidores restabelecidos representará a solução mais adequada para minimizar o impacto da contingência em termos de energia. Isto ocorre porque em alguns casos existem cargas concentradas em áreas com poucos consumidores, é o caso de um parque industrial por exemplo. Neste caso serão consideradas as duas características como funções objetivo, energia restabelecida e número de consumidores interrompidos de modo a diferenciar a tomada de decisão em casos onde a relação de carga e número de consumidores não seja linear.

Minimizar o tempo de restabelecimento da energia é um fator difícil de mensurar através de expressões matemáticas, para contemplar este critério na tomada de decisão será considerado o número de chaves comutadas durante a operação de recomposição da rede afetada.

As restrições consideradas para verificar a viabilidade das transferências de carga são escolhidas de modo a permitir a operação do sistema sem que afete equipamentos e mantenha-se uma qualidade de energia aceitável. Como o restabelecimento da energia caracteriza-se por ser uma situação provisória, ou seja, até que o defeito seja sanado, para retornar a configuração de operação em regime normal, pode-se considerar um percentual de violação das características normais de operação da rede.

Para este projeto são definidas as seguintes funções objetivo e restrições para realizar o restabelecimento da energia.

### Funções Objetivo

- Restabelecer a máxima energia;
- Realizar o número mínimo necessário de operações de comutação para transferências de carga;
- Minimizar o número de consumidores interrompidos.

### Restrições

- Manter a radialidade dos sistemas;
- Não permitir violação dos ajustes dos equipamentos de proteção;
- Não permitir sobrecarga nos elementos pertencentes às redes elétricas (1), superior ao percentual permitido, o qual é definido como sendo de 120% para trechos de rede e de 80% para equipamentos como chaves e reguladores de tensão;

$$|I_i| \leq I_{imax} \cdot F_{sobregarga} \quad (1)$$

- Não permitir violação da faixa de tensão admissível nas redes primárias (2), definido em 7% de acordo com a norma vigente.

$$V_{jmin} \leq V_j \leq V_{jmax} \quad (2)$$

Onde:

$F_{sobregarga}$  – Fator de sobrecarga permitido, por exemplo, se permitir 30% de sobrecarga, usar 1.3;

$I_i$  – corrente no ramo  $i$ ;

$I_{imax}$  – corrente máxima admissível no ramo  $i$ ;

$V_j$  – módulo da tensão no nó  $j$ ;

$V_{jmin}$  – módulo da tensão mínima aceitável no nó  $j$ ;

$V_{jmax}$  – módulo da tensão máxima aceitável no nó  $j$ .

Os valores das funções objetivo serão obtidos através da consulta ao banco de dados da concessionária. Deste modo o programa comunica-se com o banco de dados da concessionária para resgatar estas informações. Para as restrições serão utilizados tanto os valores dos equipamentos em campo como os valores de tensão, corrente e potência, disponibilizados no banco de dados.

## 4 ANÁLISE MULTICRITERIAL

Para o problema de restabelecimento automático de energia torna-se imprescindível a utilização de algoritmos que auxiliem na tomada de decisão da escolha de qual opção de chaveamento representa a melhor configuração da rede após uma contingência, já que neste contexto podem existir diversas opções de restabelecimento e as ações devem ser realizadas em tempo real. Para identificar a opção que melhor representa a solução do problema, deve-se analisar o impacto que cada candidata a solução acarreta na rede de distribuição.

Quando se utiliza múltiplos objetivos para definir a melhor solução de um problema, fica impossível obter a máxima eficiência para todos os critérios ao mesmo tempo, assim deve-se buscar como solução aquela que apresenta a melhor relação de *trade-off* entre os critérios, ou seja, a solução será aquela que satisfaz tanto um critério quanto o outro. Para fazer esta análise é empregado o conceito de “área de soluções ótimas de Pareto” (HWANG e MASUD, 1979), onde se define uma região onde as soluções não podem mais ser melhoradas. Assim as alternativas que não estão dentro da região definida como Pareto ótimo não são adequadas como solução do problema.

O desafio agregado neste tipo de problema encontra-se na determinação de qual opção melhor representa as funções objetivo sem violar as restrições de operação da rede. Assim para a solução deste tipo de problema é necessário a utilização de uma metodologia de análise multicriterial, sendo possível avaliar com um maior grau de confiança a solução do problema, pois uma opção pode apresentar um resultado excelente para um critério e o oposto para outro.

Assim para construir um modelo de análise multicriterial serão utilizados dois métodos para realização do tratamento das informações de restabelecimento da energia. O primeiro deles é o algoritmo de tomada de decisão multicriterial *Bellman-Zadeh*, o qual determinará quantitativamente a opção que melhor representará a solução do problema. O outro método, o AHP, será utilizado para agregar a opinião de especialistas no grau de importância de cada



critério, de modo a contribuir com a informação qualitativa para a solução do problema. Assim nas seções 0e 0serão abordados respectivamente os métodos *Bellman-Zadeh* e AHP.

#### 4.1 Algoritmo de Tomada de decisão Multicriterial “*Bellman-Zadeh*”

Em 1970 Richard Bellman e Lofti Zadeh formulam a metodologia considerada o pilar da tomada de decisão multicriterial, propondo uma solução para problemas de otimização vetorial. Desde então diversos trabalhos, como (EKEL, 1999; BINH, 2010; BERNARDON, 2007; PEDRYCZ, 2011), aplicam esta metodologia para soluções de problemas de otimização em sistemas de energias. Para Bernardon (2007), esta metodologia apresenta vantagens significativas em comparação a outras metodologias, como por exemplo, não precisar definir preliminarmente a área de Pareto no processo de solução do problema, pois este algoritmo já garante que todas as soluções devem pertencer à área de solução de Pareto ótimo.

Conforme descrito em (PEDRYCZ, 2011), quando se aplica a metodologia de *Bellman-Zadeh* para a tomada de decisão em um ambiente *fuzzy* para resolver problemas multicriteriais, cada função objetivo  $F_p(x)$  pode ser substituída por funções objetivo *fuzzy* ou conjuntos *fuzzy* ( $A_p$ ). Para determinar as soluções  $D(x)$ , que obedecem a todos os critérios de modo representativo, realiza-se a intersecção dos conjuntos *fuzzy* da seguinte forma:  $D = \bigcap_{p=1}^q A_p$ .

Onde  $A_p$  é definido como  $A_p = \{x, \mu_p(x)\}, x \in L, p = 1, 2, \dots, q$ .

A intersecção pode ser descrita conforme mostrado em (3).

$$D(x) = \bigwedge_p^q \mu_p(x) = \min_{p=1,2,\dots,q} \mu_p(x), \quad x \in L \quad (3)$$

Onde:

$x$  – elementos pertencentes aos conjuntos *fuzzy*;

$\mu_p(x)$  – função de pertinência de  $A_p$ ;

$L$  – área de soluções permissíveis;

$p$  – sub índice referente à função objetivo ou pertinência;

$q$  – número total de funções objetivo.

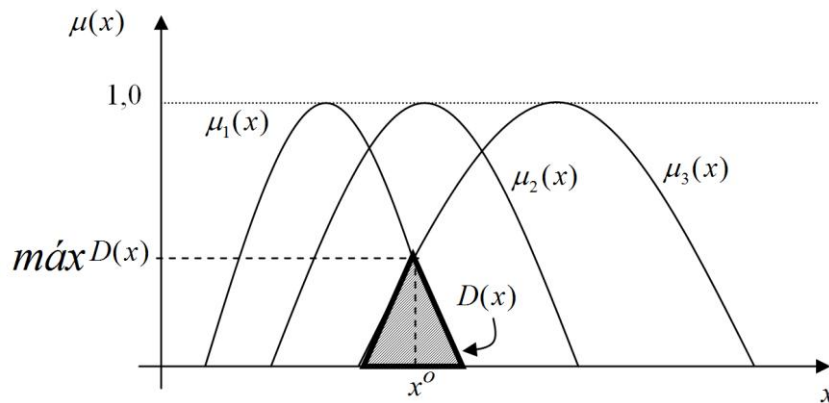
A solução é fornecida através do máximo valor do argumento da intersecção das funções pertinência, como em (4).

$$\text{máx } D(x) = \max_{x \in L} \min_{p=1,2,\dots,q} \mu_p(x) \quad (4)$$

Desta maneira o argumento  $X^o$ , solução ótima, é obtido a partir da Equação (5):

$$X^o = \arg \max_{x \in L} \min_{p=1,2,\dots,q} \mu_p(x) \quad (5)$$

Na Figura 7 é mostrada a representação gráfica da solução para um exemplo utilizando três funções objetivo.



Fonte: Adaptada de Bernardon, 2007, p. 111.

Figura 7 – Intersecção das funções pertinência e a representação da melhor solução.

Para formular as funções pertinências<sup>5</sup> necessita-se adequar as funções objetivo de maneira que a melhor alternativa represente o maior valor, para isto são utilizadas duas equações para construir as funções de pertinência, uma para minimizar e outra para maximizar as funções objetivo. Na literatura encontram-se diversas formulações para a construção das funções pertinências, ganhando destaque as equações (6) e (7), apresentadas em (PEDRYCZ et al., 2011).

Para funções objetivo que devem ser minimizada aplica-se (6).

$$\mu_p(x) = \frac{\max_{x \in L} F_p(x) - F_p(x)}{\max_{x \in L} F_p(x) - \min_{x \in L} F_p(x)} \quad (6)$$

Já para funções objetivo que devem ser maximizadas utiliza-se (7).

<sup>5</sup> Funções de pertinência são modelos matemáticos que permitem obter o grau de eficiência de um valor real, além de limitar os valores entre 0 e 1.

$$\mu_p(x) = \frac{F_p(x) - \min_{x \in L} F_p(x)}{\max_{x \in L} F_p(x) - \min_{x \in L} F_p(x)} \quad (7)$$

Em (EKEL et al., 1997) é proposto que, na existência de um número reduzido de critérios, as funções de pertinência podem ser construídas de forma simplificada a partir das Equações (8) e (9), porém vale ressaltar que a qualidade da normalização nem sempre será aceitável.

Assim, para funções objetivo que devem se minimizadas pode-se substituir (6) por sua equivalente (8).

$$\mu_p(x) = \frac{\min F_p(x)}{F_p(x)} \quad (8)$$

E para funções objetivo que devem se maximizadas pode-se substituir (7) por sua equivalente (9).

$$\mu_p(x) = \frac{F_p(x)}{\max F_p(x)} \quad (9)$$

Em (EKEL et al., 1999) é apresentada a formulação das funções pertinência levando em consideração o grau de importância que cada critério exerce na tomada de decisão, sendo este um ponto fundamental para a construção da metodologia deste TCC. Assim para que as funções pertinência contemplem o grau de importância de cada critério as novas funções pertinência são apresentadas em (10) e (11).

$$\mu_p(x) = \left[ \frac{\max_{x \in L} F_p(x) - F_p(x)}{\max_{x \in L} F_p(x) - \min_{x \in L} F_p(x)} \right]^{\lambda_p} \quad (10)$$

Para funções objetivo que devem ser minimizadas.

$$\mu_p(x) = \left[ \frac{F_p(x) - \min_{x \in L} F_p(x)}{\max_{x \in L} F_p(x) - \min_{x \in L} F_p(x)} \right]^{\lambda_p} \quad (11)$$

Para funções objetivo que devem ser maximizadas.

Onde:

$\lambda_{p=1, 2, \dots, q}$  – representa o peso do critério  $p$ .

## 4.2 Analytic Hierarchy Process (AHP)

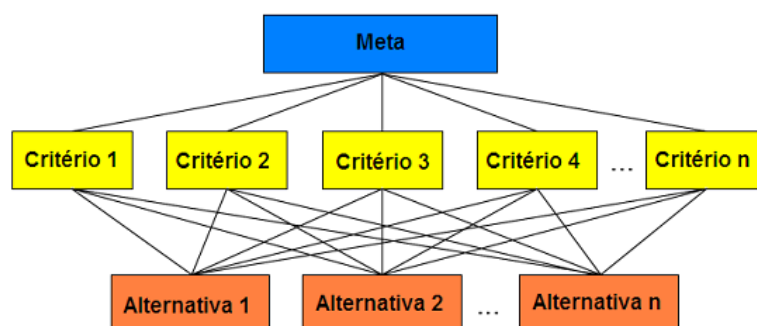
Levar em consideração a opinião de especialistas para definir o grau de importância de cada critério avaliado, mostra-se indispensável na modelagem de problemas de tomada de decisão multicritério. De maneira geral, o desafio agregado a esta ação é transformar um dado qualitativo, a opinião verbal de especialistas, em uma representação matemática adequada. Para tanto é proposto a aplicação do Algoritmo AHP, o qual consiste na qualificação do grau de importância de cada critério através da comparação par a par.

Em 1980 Saaty descreve a utilização do método AHP para a análise e solução de problemas envolvendo múltiplos critérios aplicados a diversas áreas do conhecimento, tais como: auxílio na formação de conjuntos de soluções, alocação de recursos, hierarquia de alternativas, estabelecimento de prioridades, escolha de melhor solução e planejamento. Saaty descreve o AHP como um método que mede, através da comparação par a par, o grau de importância de cada critério avaliado, sendo esta comparação, realizada com base na opinião de especialistas, os quais são guiados por uma escala de prioridades (SAATY, 2008).

A seguir será descrito a metodologia para a construção do índice de prioridade através da opinião de especialistas.

### 4.2.1 Formalização do problema AHP

Primeiramente realiza-se um mapeamento do problema definindo a meta, os critérios que serão avaliados e as alternativas consideradas. Na Figura 8 mostra-se o esquema do mapeamento de três níveis no processo de hierarquização conceitual para análises.



Fonte: Daza, 2010, p 55.

Figura 8 – Estrutura de três níveis para análise hierárquica.

As alternativas do problema, nível mais baixo do mapa, são as diversas opções as quais devem ser hierarquizadas com base no grau de preferência de cada critério. Na parte interme-

diária do mapa se tem os critérios do problema, os quais são avaliados através da estimativa de especialistas. No topo do mapa encontra-se a meta ou objetivo final, onde a meta nada mais é do que a resposta à pergunta: qual alternativa melhor representa a solução do problema com base na avaliação dos critérios. Para este TCC será avaliado apenas o grau de importância de cada critério, sendo demonstrados nas seções de 4.2.2 a 4.2.6.

#### 4.2.2 Julgamentos

Quando se avalia a solução de um problema envolvendo um grande número de critérios torna-se difícil ao especialista definir com confiança a importância de cada um. Deste modo, o método AHP fornece uma metodologia que maximiza o grau de confiabilidade dos julgamentos, isto é possível através da comparação par a par, onde cada critério é comparado um contra o outro e, deste modo, define-se quanto um critério é melhor que o outro. Para guiar o especialista no julgamento dos critérios é utilizada uma escala de intensidade, a qual converte uma opinião verbalizada em um valor numérico. Na TABELA 3 é representada a escala fundamental para a conversão numérica da verbalização dos julgamentos.

TABELA 3  
Escala numérica para comparações e julgamentos.

Escala numérica	Intensidade de importância
1	Mesma importância
2	Fraca ou leve
3	Importância moderada
4	Mais moderada
5	Forte importância
6	Mais forte
7	Muito forte
8	Muito, muito importante
9	Extremamente importante

Para este trabalho utilizou-se um programa para determinar a estimativa dos especialistas através da comparação par a par. Na Figura 9, mostra-se a interface utilizada para obtenção da estimativa de um especialista considerando três funções objetivo.

Definição do Grau de Prioridade dos Critérios para o Restabelecimento da Energia em Situações de Contingência	
AVALIADOR	<input type="text"/>
COMPARAÇÃO	
C1 5	<input type="button" value="&lt;"/> <input type="text"/> <input type="button" value="&gt;"/>
C1 9	<input type="button" value="&lt;"/> <input type="text"/> <input type="button" value="&gt;"/>
C2 2	<input type="button" value="&lt;"/> <input type="text"/> <input type="button" value="&gt;"/>

Figura 9 – Programa para a realização da comparação par a par.

Na avaliação mostrada na Figura 9, observa-se o seguinte grau de intensidade na comparação dos critérios:

- C1 possui uma forte importância sobre C2;
- C1 possui uma extrema importância sobre C3;
- C2 possui leve importância sobre C3.

Deste modo é possível determinar o quão relevante um critério domina o outro, e com isso, inferir o grau de relevância de cada um deles.

#### 4.2.3 Construção da matriz de prioridades

A partir da comparação par a par, obtida através da estimativa de especialistas, é possível construir uma matriz a qual representa matematicamente os julgamentos definidos para cada critério. A matriz de comparações é construída obedecendo a um conjunto de regras, de modo que a matriz resultante tem dimensão quadrada e os elementos inferiores a diagonal principal são o inverso dos elementos superiores a diagonal principal. A matriz de comparação é construída da seguinte forma:

Dada uma matriz  $A = a_{ij}$  de dimensões  $n \times n$ .

Sendo:

$i$  – Subíndice referente à linha da matriz  $A$ , com  $i=1,2,\dots,n$ ;

$j$  – Subíndice referente à coluna da matriz  $A$ , com  $j=1,2,\dots,n$ ;

$a_{ij}$  – Elemento pertencente a matriz  $A$  localizado na linha  $i$  e coluna  $j$ ;

$n$  – Número de critérios.

Pra construir a matriz de comparações define-se um modelo no qual cada linha e cada coluna são representadas por um critério, sendo o elemento da matriz  $a_{ij}$  o resultado da comparação entre o critério da linha com o critério da coluna. Na Equação (12) é mostrado o modelo construído para obtenção da matriz de comparações.

$$A = a_{ij} = \begin{matrix} & \mathbf{C}_1 & \mathbf{C}_2 & \cdots & \mathbf{C}_n \\ \mathbf{C}_1 & \left( \begin{array}{cccc} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \cdots & 1 \end{array} \right) \end{matrix} \quad (12)$$

O preenchimento de cada valor da matriz de comparações deve ser visto como o julgamento da predominância do critério da linha sobre o critério da coluna, assim os valores de  $a_{ij}$  são obtidos através da comparação do critério da linha ( $C_i$ ) com critério da coluna ( $C_j$ ) e, dependendo da relação destes critérios são definidos os seguintes valores de  $a_{ij}$ :

- $w_{ij}$ , se  $C_i$  domina  $C_j$ ;
- $1/w_{ij}$ , se  $C_j$  domina  $C_i$ ;
- 1, se nenhum domina o outro.

Onde:

$w_{ij}$  – valor atribuído a comparação do critério da linha  $i$  com a coluna  $j$  na comparação par a par;

$C_i$  – Critério da linha da matriz  $A$ ;

$C_j$  – Critério da coluna da matriz  $A$ .

Para utilizar como exemplo, será determinado a matriz de comparações para os dados mostrados na Figura 9. Assim, considerando a definição citada, a matriz de comparação resultante é mostrada na Equação (13).

$$A = a_{ij} = \begin{matrix} & \mathbf{C}_1 & \mathbf{C}_2 & \mathbf{C}_3 \\ \mathbf{C}_1 & \left( \begin{array}{ccc} 1 & 5 & 9 \\ 1/5 & 1 & 2 \\ 1/9 & 1/2 & 1 \end{array} \right) \end{matrix} \quad (13)$$

Através desta sequência de passos obtém-se a matriz de comparações a qual representa matematicamente o julgamento verbal obtido através da opinião de especialistas.

#### 4.2.4 Determinação da solução

A solução da metodologia AHP consiste em encontrar, através da matriz de comparações, os índices que representam o grau de importância de cada critério. Da matriz de comparações devem ser extraídas duas informações fundamentais, o valor máximo do autovalor e o autovetor associado a este autovalor. Para determinar estes valores, teoricamente, empregam-se conhecimentos de álgebra linear, porém há na literatura algumas soluções para este tipo de problema que determinam de maneira aproximada o autovalor e o autovetor da matriz de comparações. A seguir será demonstrado o cálculo para os dois casos.

##### 4.2.4.1 Solução Calculada

No método calculado, Saaty demonstra em (SAATY, 2003) que a prioridade dos critérios é determinada através do autovetor da matriz de comparações. A solução inicia-se através da estimação do vetor prioridade ( $v$ ) o qual deve satisfazer a relação  $A.v=C.v$ , com  $C$  constante e maior que zero. Para que a relação anterior seja satisfeita,  $v$  deve ser um múltiplo positivo do autovetor principal de  $A$  e  $C$  deve ser o autovalor máximo de  $A$ .

Esta notação deve ser adota, pois as matrizes utilizadas no método AHP apresentam um pequeno grau de inconsistência (matriz quase consistente), sendo necessário estimar um valor para  $v$ .

Uma matriz quase consistente,  $A=a_{ij}$ , possui um pequeno grau de perturbação comparado aos valores de uma matriz consistente,  $W=(W_i/W_j)$ , mostrada em (14), sendo a relação entre estas duas matrizes representada através do produto de *Hadamard*:  $A = W \circ E$ , onde a perturbação é representada por  $E = \varepsilon_{ij}$  e afeta cada um dos termos da matriz ( $a_{ij} * \varepsilon_{ij}$ ), sendo  $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^{-1}$  e, para matrizes sem perturbação,  $\varepsilon_{ij} = 1$ .

$$W = \begin{pmatrix} W_1/W_1 & W_1/W_2 & \dots & W_1/W_n \\ W_2/W_1 & W_2/W_2 & \dots & W_2/W_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ W_n/W_1 & W_n/W_2 & \dots & W_n/W_n \end{pmatrix} \quad (14)$$

Ao valor de  $E$  está associado à característica do máximo autovalor da matriz de comparações  $A$  e representa o quanto uma matriz é diferente de uma matriz consistente, sendo definido pelo somatório dos elementos de  $\varepsilon_{ij}$  de cada coluna da matriz  $A$ , como mostra a Equação (15).



$$\sum_{j=1}^n \varepsilon_{ij} = \lambda_{m\acute{a}x} \quad (15)$$

Em (Saaty, 2000) é definida a determinação do autovetor e do autovalor através da Equação (16).

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} v_j = \lambda_{m\acute{a}x} v_i \quad (16)$$

Com:  $\sum_{i=1}^n v_i = 1$ .

Onde:

$\lambda_{m\acute{a}x}$  – Máximo autovalor da matriz  $A$ .

$v$  – Autovetor associado ao  $\lambda_{m\acute{a}x}$  da matriz  $A$ ;

Para achar os valores de  $\lambda_{m\acute{a}x}$  podem ser utilizados cálculos iterativos, e com este valor determinar o valor de  $v$ , porém os cálculos deste parâmetro podem ser determinados através de sistemas computacionais, como por exemplo, MATLAB®.

#### 4.2.4.2 Solução Simplificada

A solução aproximada para a determinação da hierarquia dos critérios através da matriz de comparações é a alternativa mais utilizada nos trabalhos encontrados na literatura e apresenta-se de duas formas. A busca de uma solução mais simplificada não consiste em facilitar os cálculos dos índices de prioridade, já que a solução calculada não exige muito esforço computacional. Porém o objetivo é oferecer uma maneira rápida e intuitiva para o especialista calcular os índices de prioridade (DAZA, 2010).

Saaty apresenta uma metodologia para a construção da solução aproximada dos índices de prioridade. Com base nos trabalhos publicados por (SAATY, 1990) e (SAATY, 2003) a solução simplificada é construída de acordo com a Equação (17).

$$P_K = \frac{\frac{\sum_{j=1}^n a_{kj}}{a_{kk}}}{\sum_j \frac{1}{a_{kj}} * \sum_j a_{kj}} \quad (17)$$

Como na matriz de comparações os valores de  $a_{kk}$  serão sempre iguais a 1, a Equação (17) pode ser reescrita da forma simplificada (WOLFF, 2008), mostrada na Equação (18).

$$P_k = \frac{1}{\sum_j \frac{1}{a_{kj}}} \quad (18)$$

Outra maneira para calcular, de modo simplificado, o peso dos critérios vem sendo bastante utilizado na literatura. Em (WANG et al., 2008 ) e (PAMPLONA, 1999) o peso dos critério é determinado de acordo com a Equação (19). Neste método realiza-se a média geométrica dos elementos de cada linha da matriz  $A$ , obtendo uma matriz coluna, e em seguida faz-se a normalização da matriz coluna através da soma dos elementos obtidos na média geométrica.

$$P_k = \frac{(\prod_{j=1}^n a_{ij})^{1/n}}{\sum_{k=1}^n (\prod_{j=1}^n a_{kj})^{1/n}} \quad (19)$$

Onde:

$P_k$ – Prioridade do critério  $k$ ;

$k$  – Subíndice referente prioridade do critério;

Assim encontra-se o índice de cada critério  $P_k$  e através desta solução constrói-se uma hierarquia do grau de importância de cada critério. No Quadro 1, pode-se comparar os valores da prioridade dos critérios determinados para três matrizes diferentes através dos três métodos apresentados anteriormente. O calculado, obtido através da ferramenta MATLAB®, o simplificado proposto por Saaty e o simplificado encontrado em (PAMPLONA, 1999).

#### QUADRO 1

Comparação de resultados dos autovetores para os três métodos de cálculo apresentados.

Matriz	Calculado	Simplificado (Saaty)	Simplificado (Pamplona)
$\begin{pmatrix} 1 & 5 & 9 \\ 1/5 & 1 & 2 \\ 1/9 & 1/2 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,7608 \\ 0,1576 \\ 0,0816 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,7627 \\ 0,1538 \\ 0,0833 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0,7608 \\ 0,1576 \\ 0,0816 \end{pmatrix}$
$\begin{pmatrix} 1 & 1/5 & 1/9 \\ 5 & 1 & 1/2 \\ 9 & 2 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.0660 \\ 0.3187 \\ 0.6153 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.0667 \\ 0.3125 \\ 0.6207 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.0660 \\ 0.3187 \\ 0.6153 \end{pmatrix}$
$\begin{pmatrix} 1 & 9 & 5 \\ 1/9 & 1 & 2 \\ 1/5 & 1/2 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.7688 \\ 0.1309 \\ 0.1003 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.7627 \\ 0.0952 \\ 0.1250 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.7688 \\ 0.1309 \\ 0.1003 \end{pmatrix}$

Avaliando a precisão das respostas, o método encontrado em (WANG et al., 2008 ) e (PAMPLONA, 1999) apresenta os mesmos resultados obtidos através do método calculado, considerando a precisão de quatro casas decimais. Já o método proposto por Saaty possui uma pequena diferença em comparação ao autovetor calculado. Deste modo quando existir a necessidade da utilização para cálculos do autovetor considerando 3 critérios torna-se mais confiável a utilização do método utilizado por Pamplona.

#### 4.2.5 Medida de Inconsistência

Apesar das estimativas serem realizadas por especialistas, a possibilidade de existir um erro no julgamento dos critérios não pode ser descartado. Quando se analisa um grande número de critérios a chance de um julgamento ser inconsistente aumenta, tornando-se de grande importância a utilização de uma ferramenta que forneça o grau de confiança dos julgamentos. Um dos grandes diferenciais da metodologia AHP, para definir a importância dos critérios avaliados, é a possibilidade de medir a inconsistência da informação fornecida pelo especialista e, através desta informação, descartar julgamentos imprecisos.

Com o objetivo de medir a inconsistência das medidas dos julgamentos, Saaty propõe em (SAATY, 2007) um método matemático para definir esta medida. Este método realiza a medida de consistência com base no número de critério utilizado e o autovalor da matriz de comparações. A seguir será mostrada a construção deste índice.

Primeiramente, para a determinação do índice de consistência, deve-se obter o autovalor máximo da matriz de comparações. Lembrando que o autovalor máximo de uma matriz quase consistente representa o quanto esta matriz é diferente de uma matriz consistente. Assim, considera-se a matriz  $A$  mostrada na Equação (13), pode-se obter o autovalor da matriz através da Equação (20).

$$A * W = \lambda_{m\acute{a}x} * W \quad (20)$$

Com base na metodologia utilizada como referência deve-se encontrar o autovalor correspondente a cada critério, assim aplica-se a Equação (21) para determinar o conjunto de autovalores.

$$\lambda_k = \frac{\sum_j (a_{kj} * P_j)}{P_k} \quad (21)$$

Onde:

$\lambda_k$  – Autovalor do critério k;

Após determinar todos os autovalores correspondentes aos  $n$  critérios envolvidos, obtêm-se o  $\lambda_{máx}$ , mostrado na Equação (22), o qual representa o valor máximo dos autovalores dos critérios.

$$\lambda_{máx} = \max_{k=1,2,\dots,n} \lambda_k \quad (22)$$

Deste modo têm-se todos os valores necessários para obtenção do índice de consistência (IC), mostrado na Equação (23).

$$IC = \frac{\lambda_{máx} - n}{n - 1} \quad (23)$$

Este índice reflete o quanto uma matriz de comparações se distância de uma matriz de consistência. Porém não avalia o nível de dificuldade da construção dos julgamentos á medida que o número de critérios aumenta. Assim, para levar em conta a dificuldade do julgamento em relação ao número de critérios, utiliza-se a razão de consistência ( $RC$ ) e pode ser calculado conforme Equação (24).

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (24)$$

Onde:  $IR$  é o índice randômico de consistência e é definido de acordo com os números de critérios utilizados, conforme estipulado na TABELA 4.

TABELA 4  
Relação do número de critério com o índice randômico.

Quantidade Critérios	Valor de IR
1	0,00
2	0,00
3	0,52
4	0,89
5	1,11
6	1,25
7	1,35
8	1,40
9	1,45
10	1,49
11	1,52
12	1,54
13	1,56
14	1,58
15	1,58

Para julgar consistente ou não a opinião de especialistas, o índice *RC* deve ser menor que o valor máximo definido. Assim o índice *RC* não deve ultrapassar os valores correspondentes, mostrado na TABELA 5.

TABELA 5  
Relação do número de critérios com o valor máximo de *RC*.

Quantidade Critérios	RC máximo
1	0,00
2	0,00
3	0,05
4	0,08
5 a 15	0,10

Quando uma medida caracteriza-se como inconsistente ela pode ser descartada ou então revisada pelo especialista que a preencheu para adequar os julgamentos.

#### 4.2.6 Integralização de resultados

Quando se considera a opinião de diversos especialistas é de se esperar que cada um tenha uma percepção diferente a respeito dos critérios avaliados em um projeto. Assim, quando necessário considerar diversas opiniões envolvendo o julgamento do grau de importância de cada critério, faz-se necessário a utilização de uma metodologia que represente em apenas um modelo a estimativa avaliada por diversos especialistas. Para isto em (SAATY, 2005) é demonstrado uma metodologia para integralizar resultados. A integralização consiste em realizar uma média geométrica de todos os valores de  $a_{ij}$ , referente a cada matriz de comparações, fornecida pelos especialistas. A integralização dos resultados é obtida de acordo com a Equação (25).

$$\bar{A}_{ij} = \prod_{e=1}^{ne} (a_{ij_e})^{1/ne} \quad (25)$$

Onde:

$\bar{A}_{ij}$  – Valor integralizado dos elementos  $a_{ij}$  de  $k$  opiniões avaliadas;

$a_{ij_e}$  – Elemento da linha  $i$  e da coluna  $j$  da matriz de julgamento do especialista  $e$ ;

$e$  – Número de especialistas envolvidos;

$ne$  – Número de critérios considerados.

Assim a nova matriz de comparações deve ser reescrita contemplando os valores integralizados, esta nova matriz é mostrada na Equação (26).

$$\bar{A} = \begin{matrix} & \mathbf{C}_1 & \mathbf{C}_2 & & \mathbf{C}_n \\ \mathbf{C}_1 & 1 & \bar{A}_{12} & \dots & \bar{A}_{1n} \\ \mathbf{C}_2 & 1/\bar{A}_{12} & 1 & \dots & \bar{A}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{C}_n & 1/\bar{A}_{1n} & 1/\bar{A}_{2n} & \dots & 1 \end{matrix} \quad (26)$$

Em alguns casos pode ocorrer a existência de medidas que, embora sejam consistentes, apresentam opinião dispersa das demais. Neste caso a integralização dos resultados não apresenta resultados confiantes (SAATY, 2005).

## 5 METODOLOGIA PROPOSTA

A proposta deste trabalho consiste em unir as duas metodologias descritas nas seções anteriores para definir a melhor candidata para o restabelecimento da energia. Assim será utilizado o método AHP para determinar o grau de importância de cada critério com base na opinião de especialistas e o algoritmo de *Bellman-Zadeh* para definir o ranque das melhores soluções. Além disto, será adicionada a informação do critério de desempate para definir a solução mais promissora no caso de duas ou mais soluções terem as mesmas características.

### 5.1 Estimativa de especialistas

Para determinar o grau de importância de cada critério foi coletada a opinião de 3 especialistas, os quais possuem conhecimento acadêmico e prático do problema de restabelecimento da energia. Assim conforme descrito nas funções objetivo, seção 3.2, os critérios que foram avaliados são os seguintes:

- **C1** – Máxima Energia Restabelecida;
- **C2** – Mínima comutação de Chaves;
- **C3** – Mínimo de Clientes Interrompidos.

Para a realização das estimativas dos especialistas foi solicitado o preenchimento de uma pesquisa para a obtenção da comparação par a par. Através dos valores da comparação par a par foram obtidos os valores do vetor de prioridades e o valor de *RC* para avaliar o julgamento. Estes valores foram obtidos com o auxílio da ferramenta computacional MATLAB® utilizando o código disponível no Apêndice II. A seguir será apresentada a estimativa de três especialistas e a integralização dos julgamentos consistentes.

### 5.1.1 Especialista 1

Qualificação: Especialista em Otimização de sistemas de Distribuição.

Na Figura 10 é apresentada o julgamento da comparação par a par referente ao especialista 1 para os critérios analisados.


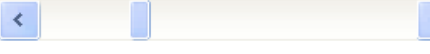

Definição do Grau de Prioridade dos Critérios para o Restabelecimento da Energia em Situações de Contingência		
AVALIADOR	Especialista em Otimização de sistemas de Distribuição	
	COMPARAÇÃO	
Máxima Energia Restabelecida 1		Mínima Comutação de Chaves 1
Máxima Energia Restabelecida 5		Mínimo de Clientes Interrompidos
Mínima Comutação de Chaves 5		Mínimo de Clientes Interrompidos

Figura 10 – Comparação par a par julgada pelo especialista 1.

Através da comparação par a par são determinados os valores do máximo autovalor e do autovetor associado a ele, estas características são mostradas no QUADRO 2.

#### QUADRO 2

Matriz de comparações, autovetor e máximo autovalor referentes a estimativa do especialista 1.

Matriz de comparações	Autovetor	Autovalor
$A_1 = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & C_3 \\ C_1 & \begin{pmatrix} 1 & 1 & 5 \\ 1 & 1 & 5 \\ 1/5 & 1/5 & 1 \end{pmatrix} \\ C_2 & \\ C_3 & \end{matrix}$	$P_1 = \begin{pmatrix} 0,45 \\ 0,45 \\ 0,10 \end{pmatrix}$	$\lambda_{m\acute{a}x} = 3,00$

Determinado o valor máximo do autovalor da matriz de comparações é calculado o valor de *IC* através de (23) e logo em seguida o valor de *RC* com base em (24). No QUADRO 3 são mostrados os valores de *IC*, *RC* e a análise da consistência, de acordo com os valores mostrados na TABELA 5.

#### QUADRO 3

Valores de *IC*, *RC* e análise da consistência par aos julgamentos do especialista 1.

Índice de consistência	Razão de consistência	Análise
0,00	0,00	Consistente

Como a matriz de comparação apresenta consistência nos julgamento, a estimativa do especialista 1 pode ser considerada.



### 5.1.2 Estimativa 2

Qualificação: Especialista em planejamento de sistemas de distribuição.

Para os julgamentos do especialista 2, a comparação par a par referente os critérios analisados são mostrados na Figura 11.

Definição do Grau de Prioridade dos Critérios para o Restabelecimento da Energia em Situações de Contingência		
AVALIADOR	Especialista em Planejamento de sistemas de Distribuição	
COMPARAÇÃO		
Máxima Energia Restabelecida 7		Mínima Comutação de Chaves
Máxima Energia Restabelecida 1		Mínimo de Clientes Interrompidos 1
Mínima Comutação de Chaves		Mínimo de Clientes Interrompidos 7

Figura 11 – Comparação par a par julgada pelo especialista 2.

Por meio da comparação par a par são determinados os valores do máximo autovalor e do autovetor associado a ele, estas características são mostradas no QUADRO 4.

#### QUADRO 4

Matriz de comparações, autovetor e máximo autovalor referentes a estimativa do especialista 2.

Matriz de comparações	Autovetor	Autovalor
$A_2 = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & C_3 \\ C_1 & \begin{pmatrix} 1 & 7 & 1 \\ 1/7 & 1 & 1/7 \\ 1 & 7 & 1 \end{pmatrix} \\ C_2 & \\ C_3 & \end{matrix}$	$P_2 = \begin{pmatrix} 0.4667 \\ 0.0667 \\ 0.4667 \end{pmatrix}$	$\lambda_{m\acute{a}x} = 3,000$

Determinado o valor máximo do autovalor da matriz de comparações é calculado o valor de *IC* através de (23) e logo em seguida o valor de *RC* com base em (24). No QUADRO 5 são mostrados os valores de *IC*, *RC* e a análise da consistência, de acordo com os valores mostrados na TABELA 5.

#### QUADRO 5

Valores de *IC*, *RC* e análise da consistência par aos julgamentos do especialista 2.

Índice de consistência	Razão de consistência	Análise
0,00	0,00	Consistente

Como a matriz de comparação apresenta consistência nos julgamento, a estimativa do especialista 2 também pode ser considerada.

### 5.1.3 Estimativa 3

Qualificação: Especialista em planejamento, análise e operação de sistemas de distribuição.

E finalmente, para os julgamentos do especialista 3, a comparação par a par referente os critérios analisados são mostrados na Figura 12.

Definição do Grau de Prioridade dos Critérios para o Restabelecimento da Energia em Situações de Contingência	
AVALIADOR	Especialista em Planejamento, análise e operação de sistemas de Distribuição
COMPARAÇÃO	
Máxima Energia Restabelecida 5	Mínima Comutação de Chaves
Máxima Energia Restabelecida	Mínimo de Clientes Interrompidos 3
Mínima Comutação de Chaves	Mínimo de Clientes Interrompidos 7

Figura 12 – Comparação par a par julgada pelo especialista 3.

Obtida a comparação par a par agora são determinados os valores do máximo autovalor e do autovetor associado a ele por meio da matriz de comparações, estas características são mostradas no QUADRO 6.

#### QUADRO 6

Matriz de comparações, autovetor e máximo autovalor referentes a estimativa do especialista 3.

Matriz de comparações	Autovetor	Autovalor
$A_3 = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & C_3 \\ C_1 & 1 & 5 & 1/2 \\ C_2 & 1/5 & 1 & 1/7 \\ C_3 & 2 & 7 & 1 \end{matrix}$	$P_3 = \begin{pmatrix} 0.3332 \\ 0.0751 \\ 0.5917 \end{pmatrix}$	$\lambda_{m\acute{a}x} = 3.0142$

Determinado o valor máximo do autovalor da matriz de comparações é calculado o valor de *IC* através de (23) e logo em seguida o valor de *RC* com base em (24). No QUADRO 7 são mostrados os valores de *IC*, *RC* e a análise da consistência.

#### QUADRO 7

Valores de *IC*, *RC* e análise da consistência par aos julgamentos do especialista 3.

Índice de consistência	Razão de consistência	Análise
0,0071	0.0136	Consistente

Para o especialista 3, também se obteve consistência nos julgamento, sendo pertinente a utilização desta estimativa.

### 5.1.4 Integralização dos Resultados

Como para os julgamentos dos três especialistas obteve-se consistência, é possível integralizar estes julgamentos para construir uma única matriz de consistência e com isso determinar o autovalor e o autovetor desta matriz resultante e obter o vetor de prioridades.

Utilizando (25) para integralizar as matrizes de comparação dos três especialistas obtém-se a matriz resultante e, a partir desta matriz, retiram-se as informações do autovetor integralizado ( $\bar{P}$ ) e do máximo autovalor integralizado ( $\overline{\lambda_{m\acute{a}x}}$ ) mostradas no QUADRO 8.

QUADRO 8

Matriz de comparações, autovetor e máximo autovalor referentes à integralização da estimativa dos três especialistas avaliados.

Matriz Integralizada de comparações	Autovetor Integralizado	Máximo Autovalor Integralizado
$\bar{A} = \begin{matrix} & \mathbf{C}_1 & \mathbf{C}_2 & \mathbf{C}_3 \\ \mathbf{C}_1 & \begin{pmatrix} 1 & 3,2711 & 1,3572 \\ 0,3057 & 1 & 0,4673 \\ 0,7368 & 2,1400 & 1 \end{pmatrix} \\ \mathbf{C}_2 & \\ \mathbf{C}_3 & \end{matrix}$	$\bar{P} = \begin{pmatrix} 0,4935 \\ 0,1570 \\ 0,3495 \end{pmatrix}$	$\overline{\lambda_{m\acute{a}x}} = 3,0016$

Com a matriz integralizada são determinados os valores do autovetor e o máximo autovalor desta matriz, e definindo a consistência da matriz integralizada, mostrados no QUADRO 9.

QUADRO 9

Valores de  $IC$ ,  $RC$  e análise da consistência para a matriz integralizada.

Índice de consistência	Razão de consistência	Análise
0,0008	0,0015	Consistente

Com o máximo autovalor da matriz integralizada se obtém a conclusão da consistência da matriz, através do índice  $RC$ , fornecendo confiabilidade nos julgamentos dos três especialistas, e com isso, pode-se utilizar o autovetor associado ao máximo autovalor da matriz integralizada, o qual representa o índice de prioridade dos critérios. Assim o peso de cada critério é mostrado na Equação (27).

$$P = \begin{matrix} \text{Máxima Energia Restabelecida} \\ \text{Mínima Comutação de Chaves} \\ \text{Mínimo de Clientes Interrompidos} \end{matrix} \begin{pmatrix} 0,4935 \\ 0,1570 \\ 0,3495 \end{pmatrix} \quad (27)$$

## 5.2 Formulação das funções pertinência

De acordo com o método de *Bellman-Zadeh*, descrito na seção 4.1 serão utilizadas as funções pertinência simplificadas, determinadas através de (8) e (9) e ainda será adicionada nas funções pertinência a informação referente ao peso de cada critério, mostrado em (27). Desta forma as funções pertinência são definidas da seguinte maneira:

- Função pertinência 1: máxima energia restabelecida

$$\mu_{1_j}(x) = \left[ \frac{F_j(x)}{\max F_j(x)} \right]^{0.4935}$$

- Função pertinência 2: mínimo de comutações de chaves

$$\mu_{2_j}(x) = \left[ \frac{\min F_j(x)}{F_j(x)} \right]^{0.1570}$$

- Função pertinência 3: mínimo de consumidores interrompidos

$$\mu_{3_j}(x) = \left[ \frac{\min F_j(x)}{F_j(x)} \right]^{0.3495}$$

Assim a solução do problema é dada pela Equação (5), e para este caso onde se considera três funções objetivo a solução pode ser determinada utilizando a representação em (28).

$$X^o = \arg \max_{x \in L} \left[ \min_{j=1 \dots op} \left( \mu_{1_j}(x), \mu_{2_j}(x), \mu_{3_j}(x) \right) \right] \quad (28)$$

Onde:

*op* – Número de candidatas a solução do problema.

## 5.3 Critério de desempate

Mesmo quando as opções de restabelecimento da energia são bastante particulares, a possibilidade de existirem opções com as mesmas características não podem ser descartadas, nestes casos pode-se obter mais de uma solução como melhor candidata ( $X^o_1$  e  $X^o_2$ , por exemplo). Para distinguir opções com os mesmo  $X^o$ , é atribuído um critério de desempate. A escolha deste critério ficou a cargo dos profissionais da concessionária AES Sul, sendo escolhido o critério: carregamento do alimentador que assumiu a carga desenergizada. No caso de existir mais de um alimentador envolvido no processo de restabelecimento, deve-se optar pela utilização do maior valor de carregamento entre os alimentadores envolvidos.

O valor do carregamento do alimentador é fornecido em porcentagem e para que o menor valor de carregamento represente a melhor alternativa no modelo matemático será utilizada a Equação (8) para normalizar os valores. Ao valor encontrado através da normalização ( $F_{desempate}$ ) será multiplicado pelo valor de  $X^o_j$  encontrados na primeira análise das funções pertinência.

Assim, no caso da existência de alternativas empatadas, a melhor solução deve ser determinada através da Equação (29), sendo aplicada apenas para as melhores soluções  $X^o$  empatadas.

$$X^o_{desempate} = \max \left( F_{desempate_{j=1\dots op}} * X^o_{j=1\dots op} \right) \quad (29)$$

$$\text{Sendo: } F_{desempate} = \frac{\min F_{CAI}(x)}{F_{CAI}(x)}$$

Onde:

$F_{CAI}(x)$  – Representa a carga do alimentador.

$F_{desempate}$  – Valor normalizada da carga do alimentador.

#### 5.4 Aplicação da metodologia

Para ilustrar a metodologia proposta será realizada a construção de um exemplo demonstrando a utilização da metodologia proposta para a determinação da solução mais promissora para realizar o restabelecimento. Para esta análise será considerada a topologia de rede mostrada na Figura 13.

Considerando a ocorrência de uma contingência na área 2 da Figura 13, existem três opções de restabelecimento da energia, mostrado na TABELA 6, para estas opções supõe-se os valores de energia restabelecida e número de consumidores interrompidos mostrados na TABELA 7. Também é considerado que nenhuma das opções viola as restrições de operação da rede de distribuição.

TABELA 6

Opções de restabelecimento da energia para a rede mostrada na Figura 6.

Alternativa	Abre Chave	Fecha Chave
1	Ch-1	Ch-3
2	Ch-2	Ch-4
3	Ch-1 e Ch-2	Ch-3 e Ch-4

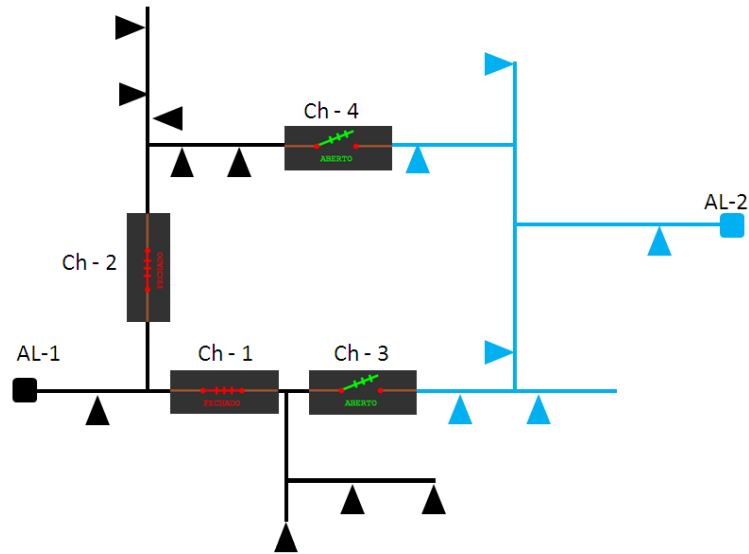


Figura 13 – Topologia de rede utilizada para a demonstração da metodologia.

TABELA 7  
Valores das funções objetivo para o exemplo de restabelecimento da energia.

Alternativas	Energia restabelecida	Chaves Comutadas	Consumidores Interrompidos
Opção 1	1250 kW	2	12000
Opção 2	2250 kW	2	8000
Opção 3	3500 kW	4	3000

No próximo passo, faz-se a transformação das funções objetivo em funções pertinência, de acordo com as Equações mostradas na seção 5.2. Deste modo o cálculo das funções pertinência é obtido da seguinte forma:

- Cálculo de  $\mu(x)$  para o critério: energia restabelecida.

$$\mu_{1_1}(x) = \left[ \frac{1250}{3500} \right]^{0.4935} = 0,601$$

$$\mu_{1_2}(x) = \left[ \frac{2250}{3500} \right]^{0.4935} = 0,804$$

$$\mu_{1_3}(x) = \left[ \frac{3500}{3500} \right]^{0.4935} = 1,00$$

- Cálculo de  $\mu(x)$  para o critério: chaves comutadas.

$$\mu_{2_1}(x) = \left[ \frac{2}{2} \right]^{0.1570} = 1$$

$$\mu_{2_2}(x) = \left[ \frac{2}{2} \right]^{0.1570} = 1,00$$

$$\mu_{2_3}(x) = \left[ \frac{2}{4} \right]^{0.1570} = 0,896$$

- Cálculo de  $\mu(x)$  para o critério: consumidores interrompidos.

$$F_{3_1}(x) = \left[ \frac{3000}{12000} \right]^{0.3495} = 0,616$$

$$F_{3_2}(x) = \left[ \frac{3000}{8000} \right]^{0.3495} = 0,710$$

$$F_{3_3}(x) = \left[ \frac{3000}{3000} \right]^{0.3495} = 1,00$$

Conforme calculado as funções pertinência têm-se os seguintes valores para cada opção de restabelecimento mostrados na TABELA 8.

TABELA 8

Funções pertinência obtidas das funções objetivo, mostradas na TABELA 7.

Alternativas	Energia Restabelecida	Chaves Comutadas	Consumidores Interrompidos
Opção 1	0,601	1	0,616
Opção 2	0,804	1	0,710
Opção 3	1	0,896	1

Utilizando (28) realiza-se a análise da solução do valor de  $X^o$ , assim a solução é construída com (30).

$$X^o = \arg \max_{x \in L} \begin{bmatrix} \min_1(0.601, 1, 0.616) \\ \min_2(0.804, 1, 0.710) \\ \min_3(1, 0.896, 1) \end{bmatrix} \quad (30)$$

Obtendo os valores mínimos de cada opção tem-se (31).

$$X^o = \arg \max_{x \in L} \begin{bmatrix} 0.601 \\ 0.710 \\ 0.896 \end{bmatrix} \quad (31)$$

E finalmente, a solução é fornecida pelo máximo valor dos mínimos valores das funções pertinência, deste modo, a melhor solução possui o seguinte valor:  $X^o = 0.896$ .

Sendo o valor de  $X^o = 0.896$  referente à opção 3 encontra-se esta alternativa como a que melhor representa as funções objetivo do problema. Na TABELA 9 pode-se visualizar de ma-

neira análoga a demonstração anterior, onde se observa os mínimos valores das funções pertinência e destaca-se a melhor solução, opção 3.

TABELA 9  
Mínimos valores das funções pertinência e destaque da melhor solução.

Alternativas	Energia Restabelecida	Chaves Comutadas	Consumidores Interrompidos	Mínimo valor
Opção 1	0,601	1	0,616	0,601
Opção 2	0,804	1	0,710	0,710
<b>Opção 3</b>	<b>1</b>	<b>0,896</b>	<b>1</b>	<b>0,896</b>

No capítulo 6 serão analisados casos reais de restabelecimento da energia e também cenários com diferentes características, complementando a demonstração feita nesta seção.



## 6 RESULTADOS

Para validar a metodologia apresentada neste TCC serão apresentados os resultados de um estudo de caso do restabelecimento da energia em uma rede real da concessionária AES SUL. O trecho de rede escolhida para este estudo é composta por 6 chaves telecomandadas distribuídas em 3 alimentadores pertencente as cidades de Sapucaia do sul, Esteio, e Gravataí. Na Figura 14 é mostrada a topologia desta rede indicando a localização das chaves telecomandadas envolvidas no estudo.

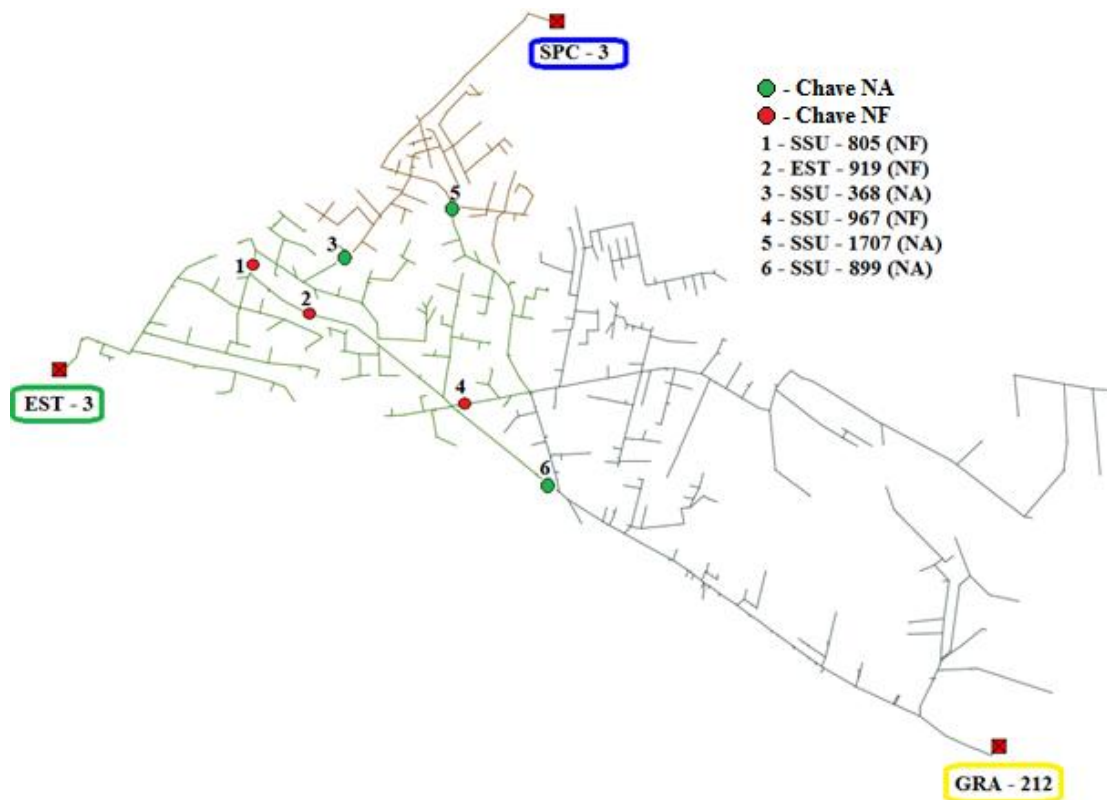


Figura 14 – Topologia da rede pertencente à AES Sul com a localização das chaves telecomandadas.

Para melhor visualizar a estrutura da rede em estudo é mostrado, na Figura 15, o diagrama unifilar da topologia desta rede, contendo apenas os equipamentos telecomandados instalados na rede.

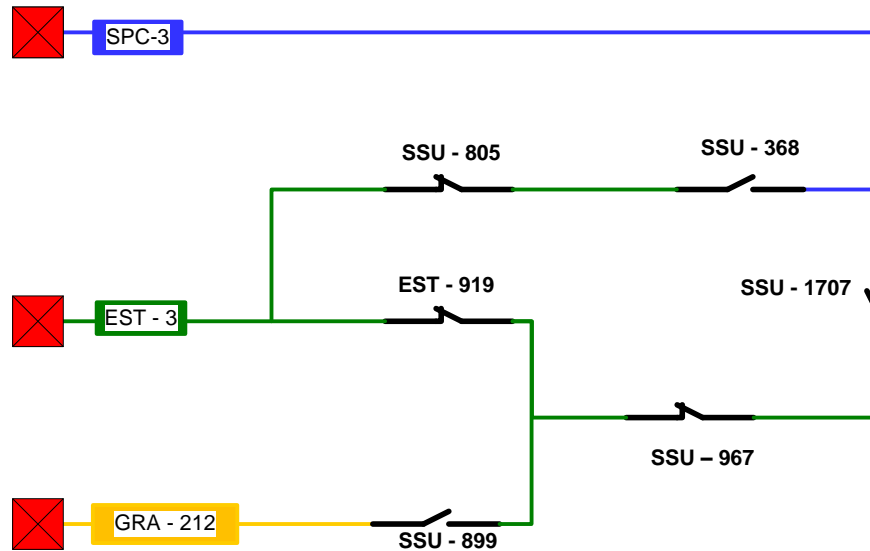


Figura 15 – Diagrama unifilar da topologia de rede mostrada na Figura 14.

Onde:

- SPC-3: Alimentador 3 da subestação de Sapucaia do Sul;
- EST-3: Alimentador 3 da subestação de Esteio;
- GRA-212: Alimentador 212 da subestação 2 de Gravataí;
- SSU-805: Chave Telecomandada NF;
- SSU-368: Chave Telecomandada NA;
- SSU-1707: Chave Telecomandada NA;
- SSU-899: Chave Telecomandada NA;
- SSU-967: Chave Telecomandada NF;
- EST-919: Chave Telecomandada NF.

Para a análise deste estudo será considerado que o defeito ocorre no disjuntor do alimentador EST-3 a 01h00min de um dia útil. Este horário foi escolhido, pois nenhuma das opções de restabelecimento viola as restrições de operação do sistema, ao contrário do ocorrido, por exemplo, as 18h00min, fornecendo maior número de opções de restabelecimento. A rede da concessionária utilizada no estudo apresenta as características de número de consumidores e a carga dos trechos de rede mostrado na TABELA 10 com base nas áreas definidas na Figura 16.

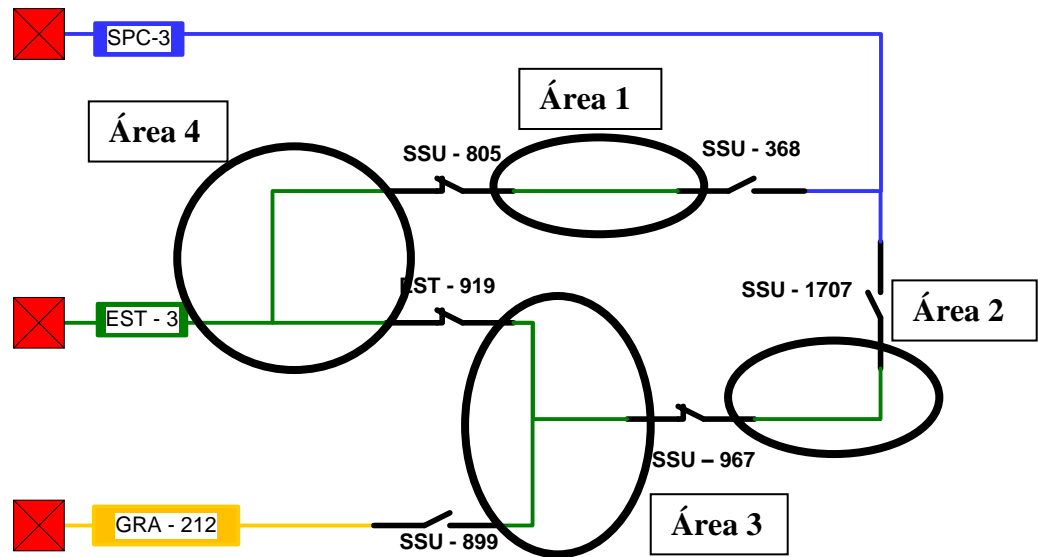


Figura 16 – Divisão da rede de distribuição em estudo dividida por áreas.

TABELA 10  
Número de consumidores e carga da rede mostrada na Figura 16.

Área	Nº de consumidores	Carga (kW)
1	2663	388,5
2	2083	499,96
3	2723	649,63
4	2348	1306,23
Total	9817	2844,32

No momento do desarme do disjuntor do alimentador afetado EST – 3, o sistema SCADA recebe a informação dos equipamentos em campo e inicia a busca das soluções de restabelecimento da energia. Assim o algoritmo encontra as opções mostradas na TABELA 11. As opções de restabelecimento foram encontradas no programa *ASE Restoration*, o qual ainda está em construção.

TABELA 11  
Opções de restabelecimento da energia para rede mostrada na Figura 14, supondo um defeito no disjuntor do alimentador EST – 3.

Opção	Abrir Chave	Fechar Chave
1	SSU-805	SSU-368
2	EST-919	SSU-899
3	EST-919	SSU -1707
4	SSU-967	SSU-1707
5	SSU-805 e EST-919	SSU-368 e SSU-899
6	SSU-967 e EST-919	SSU-1707 e SSU-899
7	SSU-805 e EST-919	SSU-1707 e SSU-368

Após determinar as opções de restabelecimento, buscam-se, no banco de dados da concessionária, os valores das funções objetivo correspondente a cada opção. Na TABELA 12

são mostrados os valores da energia restabelecida, número de chaves operadas e consumidores interrompidos, referente às funções objetivo explicadas na seção 3.2.

TABELA 12

Valores das funções objetivo para as opções de restabelecimento mostradas na TABELA 11.

Opção	Energia Restabelecida	Nº Chaves operadas	Consumidores Interrompidos
1	388,50 kW	2	7154
2	1149,59 kW	2	5011
3	1149,59 kW	2	5011
4	499,96 kW	2	7734
5	1538,09 kW	4	2348
6	1149,59 kW	4	5011
7	1538,09 kW	4	2348

Os valores do carregamento dos alimentadores envolvidos no restabelecimento da energia são disponibilizados no banco de dados da concessionária e operando em regime normal apresentam as características mostradas na TABELA 13.

TABELA 13

Valor de carregamento dos alimentadores SPC – 3 e GRA – 212.

Alimentador	Carga (kW)	Carregamento (%)
SPC – 3	1157,73	8,51
GRA – 212	3298,69	27,34

Assim para cada opção de restabelecimento, a característica de carregamento dos alimentadores que assumem a carga transferida é mostrada na TABELA 14, lembrando que na existência de mais de um alimentador envolvido na transferência de carga o valor escolhido é que apresenta maior carregamento.

TABELA 14

Novos valores de carregamento dos alimentadores SPC – 3 e GRA – 212 após assumir a carga transferida.

Opção (j)	AL: SPC -3	AL: GRA-212	Valor Escolhido	$F_{desempate}$
1	11,36%	-	11,36%	1.0000
2	-	36,87%	36,87%	0.3081
3	16,96%	-	16,96%	0.6698
4	12,18%	-	12,18%	0.9327
5	11,36%	36,87%	36,87%	0.3081
6	12,18%	36,87%	36,87%	0.3081
7	19,81%	-	19,81%	0.5734

Com os valores das funções objetivo de cada opção de restabelecimento inicia-se a busca da melhor solução através da análise multicriterial. Assim, primeiramente, realiza-se a transformação das funções objetivo nas funções pertinência, conforme mostrado no QUADRO 10, sendo que os pesos utilizados são os obtidos através da integralização da estimativa dos especialistas mostrada em (27).

QUADRO 10

Cálculo das funções pertinência para as funções objetivo mostrado na TABELA 12.

Energia Restabelecida	Chaves Comutadas	Consumidores Interrompidos
$\mu_{1_1}(x) = \left[ \frac{388,50}{1538,09} \right]^{0,4935} = 0,5071$	$\mu_{2_1}(x) = \left[ \frac{2}{2} \right]^{0,1570} = 1$	$\mu_{3_1}(x) = \left[ \frac{2348}{7154} \right]^{0,3495} = 0,6775$
$\mu_{1_2}(x) = \left[ \frac{1149,59}{1538,09} \right]^{0,4935} = 0,8662$	$\mu_{2_2}(x) = \left[ \frac{2}{2} \right]^{0,1570} = 1$	$\mu_{3_2}(x) = \left[ \frac{2348}{5011} \right]^{0,3495} = 0,7672$
$\mu_{1_3}(x) = \left[ \frac{1149,59}{1538,09} \right]^{0,4935} = 0,8662$	$\mu_{2_3}(x) = \left[ \frac{2}{2} \right]^{0,1570} = 1$	$\mu_{3_3}(x) = \left[ \frac{2348}{5011} \right]^{0,3495} = 0,7672$
$\mu_{1_4}(x) = \left[ \frac{499,96}{1538,09} \right]^{0,4935} = 0,5743$	$\mu_{2_4}(x) = \left[ \frac{2}{2} \right]^{0,1570} = 1$	$\mu_{3_4}(x) = \left[ \frac{2348}{7734} \right]^{0,3495} = 0,6593$
$\mu_{1_5}(x) = \left[ \frac{1538,09}{1538,09} \right]^{0,4935} = 1$	$\mu_{2_5}(x) = \left[ \frac{2}{4} \right]^{0,1570} = 0,8969$	$\mu_{3_5}(x) = \left[ \frac{2348}{2348} \right]^{0,3495} = 1$
$\mu_{1_6}(x) = \left[ \frac{1149,59}{1538,09} \right]^{0,4935} = 0,8662$	$\mu_{2_6}(x) = \left[ \frac{2}{4} \right]^{0,1570} = 0,8969$	$\mu_{3_6}(x) = \left[ \frac{2348}{5011} \right]^{0,3495} = 0,7672$
$\mu_{1_7}(x) = \left[ \frac{1538,09}{1538,09} \right]^{0,4935} = 1$	$\mu_{2_7}(x) = \left[ \frac{2}{4} \right]^{0,1570} = 0,8969$	$\mu_{3_7}(x) = \left[ \frac{2348}{2348} \right]^{0,3495} = 1$

Os valores das funções pertinência calculadas no QUADRO 10 são mostrados na TABELA 15.

TABELA 15

Valores das funções pertinência referente às funções objetivo mostrado na TABELA 12.

Opção (j)	$\mu_{1_j}(x)$	$\mu_{2_j}(x)$	$\mu_{3_j}(x)$
1	0,5071	1,0000	0,6775
2	0,8662	1,0000	0,7672
3	0,8662	1,0000	0,7672
4	0,5743	1,0000	0,6593
5	1,0000	0,8969	1,0000
6	0,8662	0,8969	0,7672
7	1,0000	0,8969	1,0000

De acordo com a solução para encontrar  $X^o$  a partir de (28) necessita-se determinar o valor mínimo das funções pertinência para cada opção de restabelecimento e destes valores mínimos obter o máximo valor entre eles. Assim, analisando os dados da TABELA 15, a hierarquia das candidatas à solução é mostrada na TABELA 16, onde as opções são ordenadas pelo valor máximo dos mínimos valores das funções pertinência e as opções com o mesmo valor são agrupadas no mesmo grau de preferência.

TABELA 16  
Hierarquia das candidatas à solução.

Grau de Preferência	Opção	$\min \mu_{A_j}(x)$
1º	5 e 7	0.8969
2º	2, 3 e 6	0.7672
3º	4	0.5743
4º	1	0.5071

Como melhor opção é obtida duas alternativas,  $X^o_5$  e  $X^o_7$ , com o mesmo valor. Para determinar qual destas alternativas deve ser escolhida é utilizado o critério de desempate, discutido na seção 5.3. De acordo com (29) obtém-se a relação (32).

$$X^o_{desempate} = \max(F_{desempate_5} * X^o_5, F_{desempate_7} * X^o_7) \quad (32)$$

Substituindo os valores de  $F_{desempate_5 e 7}$  mostrados na TABELA 14 e os valores de  $X^o_5 e 7$  tem-se (33).

$$X^o_{desempate} = \max(0.3081 * 0.8969, 0.5734 * 0.8969) \quad (33)$$

Realizando as multiplicações encontra-se (34).

$$X^o_{desempate} = \max(0.2763, 0.5142) \quad (34)$$

E entre os dois resultados o valor máximo é  $X^o_{desempate} = 0.5142$ .

O valor de  $X^o_{desempate}$  encontrado é referente à opção 7, definindo deste modo a opção que melhor representa a solução do problema de restabelecimento de energia para o caso considerado. Na Figura 17 é mostrado o efeito da escolha da opção 7 no restabelecimento da energia, mostrando a topologia da rede antes e depois de aplicar a metodologia descrita.

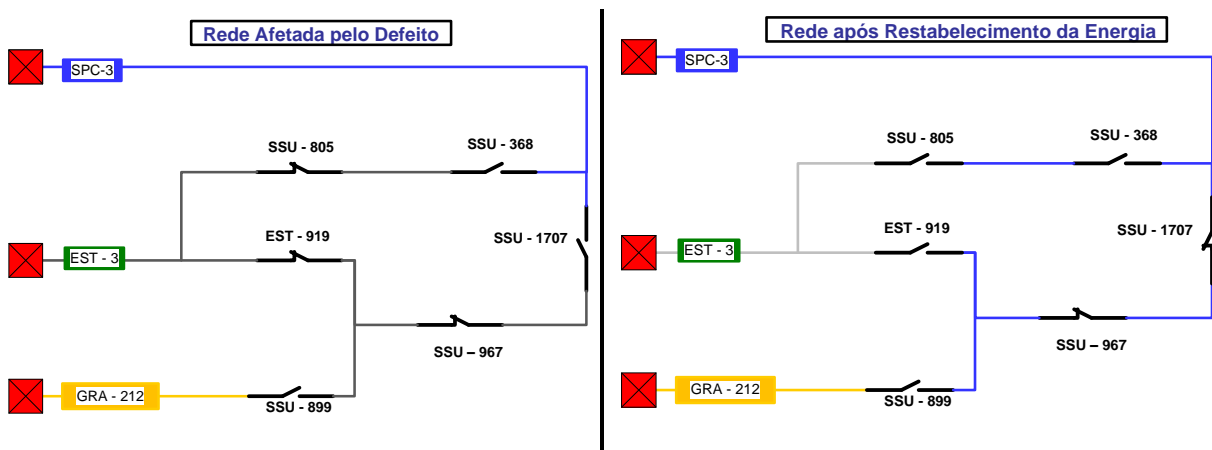


Figura 17 – topologia da rede distribuição antes (esquerda) e depois (direita) do restabelecimento da energia

Nota-se que o resultado da aplicação da metodologia alcança um bom desempenho, minimizando grande parte da área afetada. Para medir a redução do impacto da interrupção, é mostrada na TABELA 17 os valores da energia e do número de consumidores antes e depois da aplicação da metodologia proposta.

TABELA 17  
Redução do impacto da contingência com a aplicação da metodologia proposta.

Característica	Antes	Depois	Redução
Energia não Suprida	2844,32 kW	1306,23kW	42,95%
Nº de Consumidores sem Energia	9817	2348	76,08%

Lembrando que o ganho principal desta metodologia está nos tempos de restabelecimento da energia, os quais não ultrapassam 1 minuto.

Na rede piloto utilizada para o desenvolvimento do Projeto de restabelecimento automático da energia, os valores da energia restabelecida e consumidores interrompidos variam quase na mesma proporção, ou seja, a alternativa que apresenta maior carga restabelecida também apresenta o mínimo de consumidores interrompidos. Para melhor demonstrar a metodologia desenvolvida será construído um caso hipotético em que a relação carga e número de consumidores mostram-se diferente e, com este caso, será analisado a influencia de cada critério no processo de restabelecimento da energia.

### 6.1 Análise teórica da tomada de decisão multicriterial

Para melhor demonstrar o processo de tomada de decisão multicriterial, será construído um exemplo, com base nos dados reais, para caracterizar um cenário onde existem diferentes características de carga, número de consumidores e manobras de chaves. Deste modo, será considerado que exista uma grande concentração de carga, com valor de 1554,00 kW, localizada na área 1 da rede mostrada na Figura 18. Assim as novas características da rede são mostradas na TABELA 18.

TABELA 18  
Carga e número de consumidores da nova característica da rede.

Área	Nº de consumidores	Carga (kW)
1	2663	1554,00
2	2083	499,96
3	2723	649,63
4	2348	1306,23
Total	9817	4009,82

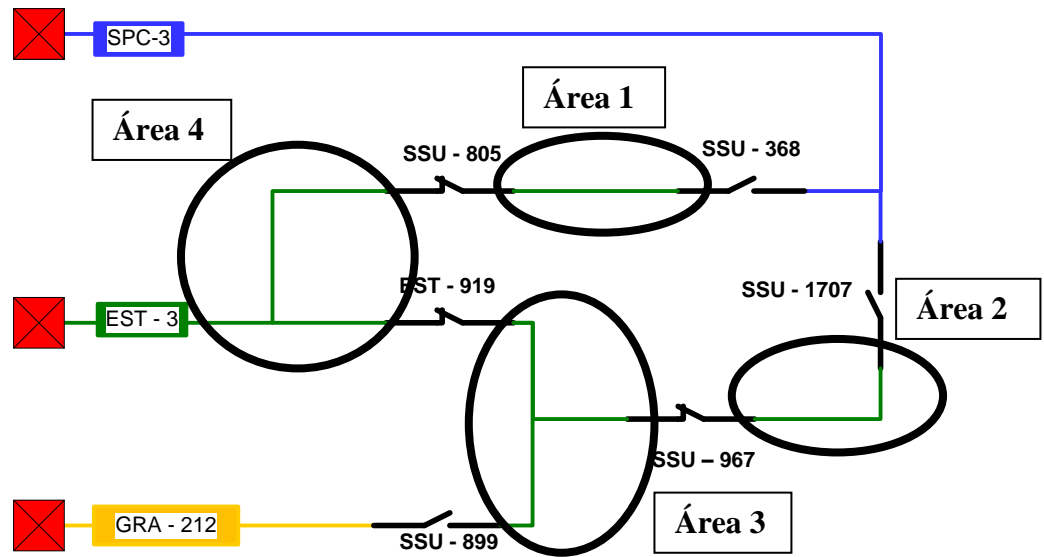


Figura 18 – Rede de distribuição dividida em áreas para a análise teórica da solução.

Supõe-se, para este estudo, que em uma situação de contingência as opções obtidas pelo algoritmo de restabelecimento da energia, são mostradas na TABELA 19.

TABELA 19  
Opções para o restabelecimento da energia para análise da metodologia.

Opção	Abrir Chave	Fechar Chave
1	SSU-805	SSU-368
2	EST-919	SSU-899
3	SSU-967	SSU-1707
4	SSU-967 e EST-919	SSU-899
5	SSU-967 e EST-919	SSU-1707 e SSU-899

De acordo com as características de rede mostradas na TABELA 18, as funções objetivo são determinadas para cada opção de restabelecimento da energia contidas na TABELA 19, obtendo assim os valores mostrados na TABELA 20.

TABELA 20  
Valores das funções objetivo para as opções de restabelecimento mostradas na TABELA 19.

Opção	Energia Restabelecida	Nº Chaves operadas	Consumidores Interrompidos
1	1554,00 kW	2	7154
2	1149,59 kW	2	5011
3	499,96 kW	2	7734
4	649,63 kW	3	7094
5	1149,59 kW	4	5011

Os valores de carregamento dos alimentadores, operando em regime normal, são os mesmos para o caso real, mostrado na TABELA 13. Porém, nas transferências de carga, os valores de carregamento dos alimentadores são modificados, devido à carga da área 1 ter um novo valor, deste modo tem-se os novos valores do carregamento mostrados na TABELA 21.



TABELA 21  
Carregamento dos alimentadores envolvidos no restabelecimento da energia.

Opção	AL: SPC -3	AL: GRA-212	Valor Escolhido	$F_{desempate}$
1	19,93%	-	0,1993	0,6111
2	-	36,87%	0,3687	0,3303
3	12,18%	-	0,1218	1,0000
4	-	32,72%	0,3272	0,3722
5	12,18%	32,72%	0,3272	0,3722

Calculando as funções pertinência, mostrados no QUADRO 11, com os valores da TABELA 20 obtém-se as funções pertinência, mostrados na TABELA 22.

QUADRO 11  
Cálculo das funções pertinência para as funções objetivo mostrado na TABELA 20.

Energia Restabelecida	Chaves Comutadas	Consumidores Interrompidos
$\mu_{1_1}(x) = \left[ \frac{1554,00}{1554,00} \right]^{0.4935} = 1.0000$	$\mu_{2_1}(x) = \left[ \frac{2}{2} \right]^{0.1570} = 1$	$\mu_{3_1}(x) = \left[ \frac{5011}{7154} \right]^{0.3495} = 0.8228$
$\mu_{1_2}(x) = \left[ \frac{1149,59}{1554,00} \right]^{0.4935} = 0.8618$	$\mu_{2_2}(x) = \left[ \frac{2}{2} \right]^{0.1570} = 1$	$\mu_{3_2}(x) = \left[ \frac{5011}{5011} \right]^{0.3495} = 0.9318$
$\mu_{1_3}(x) = \left[ \frac{499,96}{1554,00} \right]^{0.4935} = 0.5714$	$\mu_{2_3}(x) = \left[ \frac{2}{2} \right]^{0.1570} = 1$	$\mu_{3_3}(x) = \left[ \frac{5011}{7734} \right]^{0.3495} = 0.8007$
$\mu_{1_4}(x) = \left[ \frac{649,63}{1554,00} \right]^{0.4935} = 0.6502$	$\mu_{2_4}(x) = \left[ \frac{2}{3} \right]^{0.1570} = 0.9383$	$\mu_{3_4}(x) = \left[ \frac{5011}{7094} \right]^{0.3495} = 1.0000$
$\mu_{1_5}(x) = \left[ \frac{1149,59}{1554,00} \right]^{0.4935} = 0.8618$	$\mu_{2_5}(x) = \left[ \frac{2}{4} \right]^{0.1570} = 0.8969$	$\mu_{3_5}(x) = \left[ \frac{5011}{5011} \right]^{0.3495} = 0.9318$

TABELA 22  
Valores das funções pertinência para as funções objetivo da TABELA 11.

Opção (j)	$\mu_{1_j}(x)$	$\mu_{2_j}(x)$	$\mu_{3_j}(x)$
1	1.0000	1.0000	0.8228
2	0.8618	1.0000	0.9318
3	0.5714	1.0000	0.8007
4	0.6502	0.9383	1.0000
5	0.8618	0.8969	0.9318

Extraindo a informação do valor mínimo dos critérios para cada opção de restabelecimento e tomando os valores máximos, obtém-se a hierarquia das candidatas à solução, mostrada na TABELA 23, onde as opções são ordenadas de maneira decrescente e as que possuem o mesmo valor são agrupadas.

TABELA 23  
Hierarquia das candidatas a solução.

Preferência	Opção	$\min \mu_{A_j}(x)$
1º	2 e 5	0.8618
2º	1	0.8228
3º	4	0.6502
4º	3	0.5714

Como as alternativas 2 e 5 ficaram empatadas, com  $X^o = 0.8618$ , é aplicado o critério de desempate. Deste modo, pegando o valor do carregamento das opções 2 e 5 disponíveis na TABELA 21 é determinado melhor a opção. Na TABELA 24 é mostrado o cálculo do critério de desempate.

TABELA 24  
Cálculo do desempate das opções 2 e 5.

Opção ( $j$ )	$X^o_j$	$F_{desempate_j}$	$F_{desempate_j} * X^o_j$
2	0.8618	0,3303	0,2846
<b>5</b>	<b>0.8618</b>	<b>0,3722</b>	<b>0,3207</b>

Assim a opção que melhor representa a solução do problema é a alternativa 5, obtendo um máximo valor de  $X^o_{desempate} = 0,3207$ .

Na opção 5 o restabelecimento da energia é realizado através do fechamento das chaves SSU – 899 e SSU – 368 e da abertura das chaves EST – 919 e SSU – 805. Na Figura 19 é mostrada a topologia da rede antes e depois da aplicação da metodologia, e, para mesurar a redução do impacto da contingência, são mostrados na TABELA 25 os valores da energia não suprida e do número de consumidores sem energia antes e depois do restabelecimento da energia.

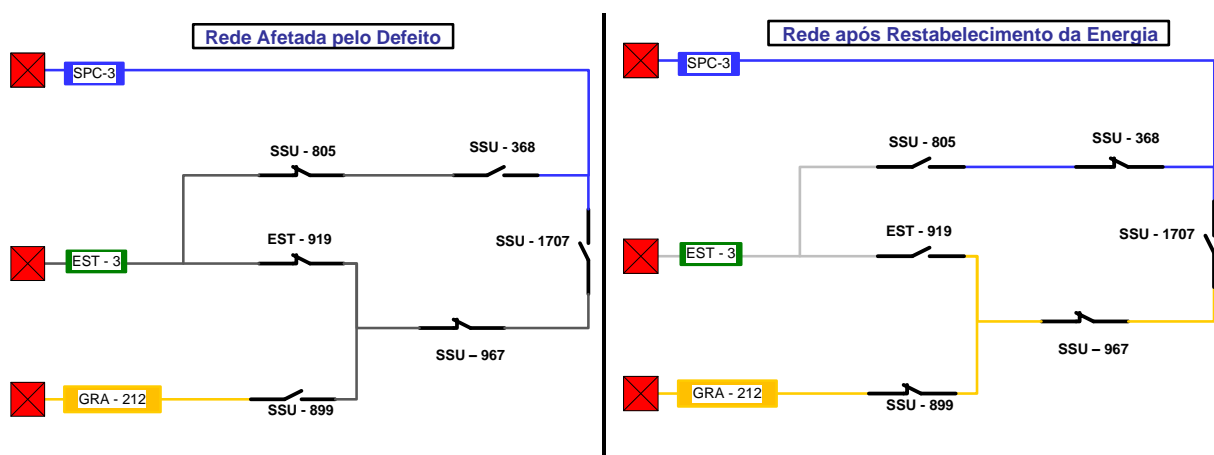


Figura 19 – Topologia da rede de distribuição antes (esquerda) e depois (direita) da aplicação da opção 7 para o restabelecimento da energia..

TABELA 25  
Redução do impacto da contingência com a escolha da opção 5.

Característica	Antes	Depois	Redução
Energia não Suprida	4009,82kW	2860,23kW	28,67%
Consumidores sem Energia	9817	5011	48,95%

## 6.2 Análise teórica sem considerar a opinião de especialistas

Quando não está sendo considerada a opinião de especialistas para obter a solução do problema elimina-se a informação qualitativa da tomada de decisão. Para isto os pesos utilizados para o cálculo das funções pertinência são:  $P_1 = 1$ ,  $P_2 = 1$ ,  $P_3 = 1$ . As funções pertinência, obtidas com os valores das funções objetivo da TABELA 20, são mostradas na TABELA 26.

TABELA 26  
Funções pertinência sem considerar a opinião de especialistas.

Opção ( $j$ )	$\mu_{1j}(x)$	$\mu_{2j}(x)$	$\mu_{3j}(x)$
1	1.0000	1.0000	0.7004
2	0.7398	1.0000	1.0000
3	0.3217	1.0000	0.6479
4	0.4180	0.6667	0.7064
5	0.7398	0.5000	1.0000

Assim a prioridade das alternativas para a tomada de decisão sem levar em conta a estimativa dos especialistas é mostrada na TABELA 27.

TABELA 27  
Hierarquia das soluções sem considerar a opinião dos especialistas.

Preferência	Opção ( $j$ )	$\min \mu_{A_j}(x)$
1°	2	<b>0.7398</b>
2°	1	0.7004
3°	5	0.5000
4°	4	0.4180
5°	3	0.3217

Sem a consideração dos pesos, o critério “chaves comutadas” ganha maior relevância na tomada de decisão, fazendo com que seja determinante na solução para este caso. A escolha da opção 2 para o restabelecimento da energia faz a comutação de duas chaves, uma NA, EST – 919, outra NF, SSU – 899. Na Figura 20 é mostrada a topologia de rede antes e depois da aplicação da metodologia de restabelecimento da energia e na TABELA 28 são mostrados os valores da redução do impacto da contingência após o restabelecimento da energia

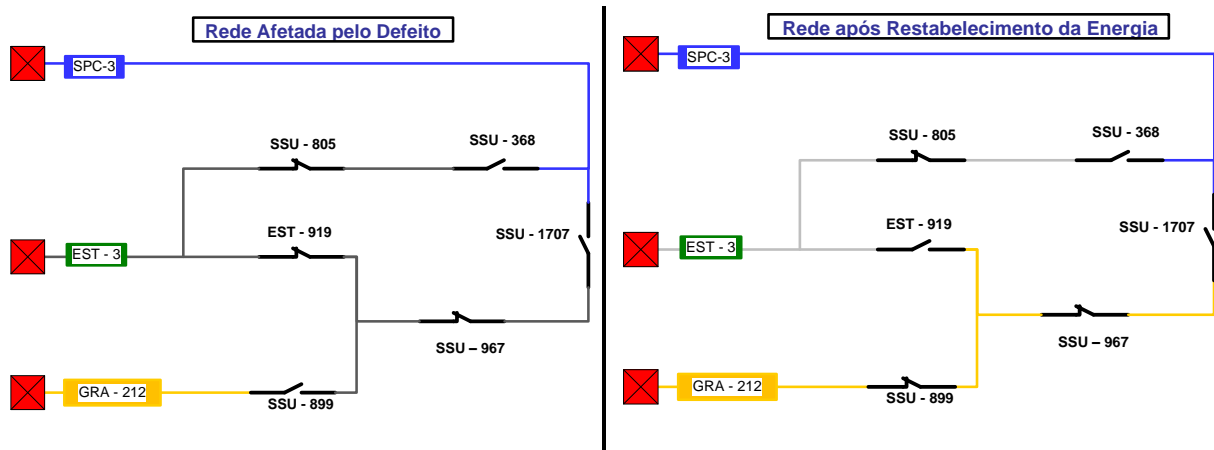


Figura 20 – Topologia da rede em estudo antes e depois da aplicação da metodologia para opção 2 de restabelecimento da energia.

TABELA 28  
Redução do impacto da contingência com a utilização da opção 2.

Característica	Antes	Depois	Redução
Energia não Suprida	4009,82kW	2860,23kW	28,67%
Consumidores sem Energia	9817	5011	48,95%

Observa-se que a não consideração da opinião dos especialistas acarreta em uma menor redução do impacto da contingência, mostrando a importância de considerar esta informação

### 6.3 Análise teórica considerando apenas o critério de Energia Restabelecida

Uma avaliação importante para o estudo de métodos multicriteriais é a avaliação individual de cada critério para determinar a relevância de cada critério na solução do problema.

Assim serão atribuídos, neste primeiro caso, os seguintes valores dos pesos dos critérios às funções objetivo da TABELA 20:  $P_1 = 1$ ,  $P_2 = 0$ ,  $P_3 = 0$ , de modo a representar apenas os valores referentes à função objetivo: energia restabelecida. Com estes novos valores de peso as funções pertinência resultam nos valores mostrados na TABELA 29.

TABELA 29  
Funções pertinência considerando apenas o critério: energia restabelecida.

Opção (j)	$\mu_{1j}(x)$	$\mu_{2j}(x)$	$\mu_{3j}(x)$
1	1.0000	1	1
2	0.7398	1	1
3	0.3217	1	1
4	0.4180	1	1
5	0.7398	1	1

Como os mínimos valores serão sempre os próprios valores da função pertinência  $\mu_{1j}(x)$ , basta pegar o máximo valor desta função pertinência para obter a solução  $X^0$ . Assim a hierarquia da solução considerando o critério de energia restabelecida é mostrada na TABELA 30.

TABELA 30  
Hierarquia das soluções considerando apenas o critério de energia restabelecida.

Preferência	Opção(j)	$\min \mu_{A_j}(x)$
1°	1	1,00
2°	2 e 5	0,74
3°	4	0,32
4°	3	0,25

A solução encontrada, neste caso, foi a opção 1. Nesta opção é realizada a abertura da chave SSU – 805 e o fechamento da chave SSU – 368, restabelecendo a energia para uma pequena parte da rede, porém com uma grande concentração de carga. Na Figura 21 é mostrada a topologia da rede antes e depois da aplicação da opção 1 no restabelecimento da energia e na TABELA 31 é mostrada a redução do impacto proporcionada escolhendo esta opção.

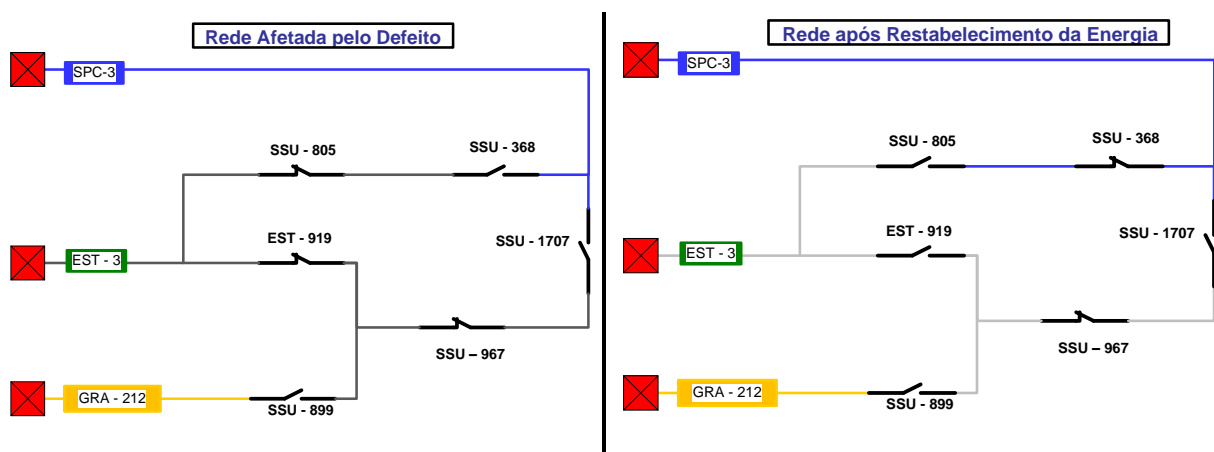


Figura 21 – Topologia antes (esquerda) e depois (direita) do restabelecimento da energia.

TABELA 31  
Redução do impacto da contingência para opção de restabelecimento 1.

Característica	Antes	Depois	Redução
Energia não Suprida	4009,82kW	2455,82	38,75%
Consumidores sem Energia	9817	7154	27,12%

#### 6.4 Análise considerando apenas número de chaves comutadas

Neste item será analisada a solução do problema considerando apenas o critério do número de chaves comutadas durante o restabelecimento da energia. Assim o valor dos pesos de cada critério fica da seguinte forma:  $P_1 = 0$ ,  $P_2 = 1$ ,  $P_3 = 0$ . Os valores das funções pertinên-

cia obtidos aplicando os novos pesos às funções objetivo da TABELA 20 são mostrados na TABELA 32.

TABELA 32  
Funções pertinência considerando apenas a função objetivo: chaves comutadas.

Opção ( $j$ )	$\mu_1(x)$	$\mu_2(x)$	$\mu_3(x)$
1	1	1	1
2	1	1	1
3	1	1	1
4	1	0,6667	1
5	1	0,5	1

Para o número de chaves comutadas a melhor opção será aquela com apenas 2 comutações, como pode-se esperar, sendo assim as três primeiras alternativas são as melhores candidatas a solução como mostra na hierarquia das soluções, visualizada na TABELA 33.

TABELA 33  
Hierarquia das soluções considerando apenas o critério de comutação de chaves.

Preferência	Opção	$\min \mu_{A_j}(x)$
1°	1, 2 e 3	1,00
2°	4	0,6667
3°	5	0,50

Neste caso existem três alternativas empatadas e assim, utilizando os valores de carregamento dos alimentadores, encontram-se os resultados mostrados na TABELA 34.

TABELA 34  
Determinação do valor de desempate para opções 1, 2 e 3.

Opção ( $j$ )	$X_j^o$	$F_{desempate_j}$	$F_{desempate_j} * X_j^o$
1	1,00	0,6111	0,6111
2	1,00	0,3303	0,3303
<b>3</b>	<b>1,00</b>	<b>1,0000</b>	<b>1,0000</b>

Assim, a solução encontrada, para este caso, é a opção 3, pois possui o menor valor de carregamento do alimentador comparado as opções 1 e 2. Optando por esta solução realiza-se a abertura da chave SSU – 967 e o fechamento da chave SSU – 1707, obtendo uma nova topologia de rede, mostrada na Figura 22, e na TABELA 35 é mostrada a redução do impacto da contingência aplicando a opção 3 no restabelecimento da energia.

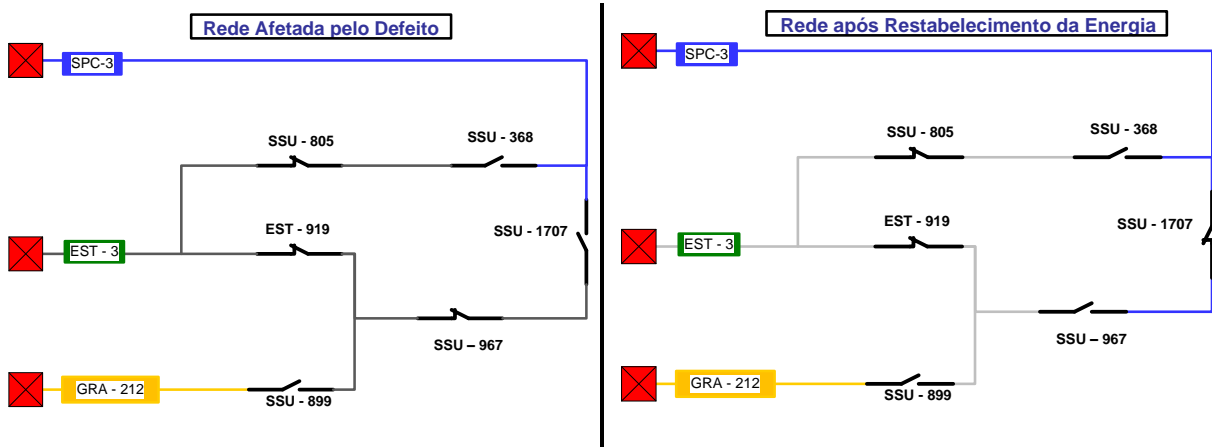


Figura 22 – Topologia da rede de distribuição antes (esquerda) e depois (direita) do restabelecimento da energia utilizando a opção 3.

TABELA 35  
Redução do impacto da contingência para opção de restabelecimento 3.

	Antes	Depois	Redução
Energia não Suprida	4009,82 kW	3510,36	12,45%
Consumidores sem Energia	9817	7734	21,21%

### 6.5 Análise Teórica considerando apenas consumidores interrompidos

Por fim, será analisada a solução do problema levando em conta apenas o critério do número de consumidores interrompidos na ocorrência da contingência. Assim os valores dos pesos dos critérios ficam da seguinte forma:  $P_1 = 0$ ,  $P_2 = 0$ ,  $P_3 = 1$ . Os valores das funções pertinência obtidos são mostrados na TABELA 36.

TABELA 36  
Funções pertinência considerando apenas a função objetivo: consumidores interrompidos.

Opção ( $j$ )	$\mu_{1_j}(x)$	$\mu_{2_j}(x)$	$\mu_{3_j}(x)$
1	1	1	0.7004
2	1	1	1.0000
3	1	1	0.6479
4	1	1	0.7064
5	1	1	1.0000

A hierarquia das soluções é mostrada na TABELA 37.

TABELA 37  
Hierarquia das soluções considerando apenas o critério de consumidores interrompidos.

Preferência	Opção	$\min \mu_{A_j}(x)$
1º	2 e 5	1,0000
2º	4	0.7064
3º	1	0.7004
4º	3	0.6479

Novamente encontra-se as opções 2 e 5 como melhor solução, assim utilizado o critério de desempate obtém-se o resultado mostrado na TABELA 38.

TABELA 38  
Determinação do valor de desempate para opções 2 e 5.

Opção	$\min \mu_{A_j}(x)$	$F_{desempate}$	$\min \mu_{A_j}(x) * F_{desempate}$
2	1,00	0,3303	0,3303
<b>5</b>	<b>1,00</b>	<b>0,3722</b>	<b>0,3722</b>

A melhor solução, neste caso é a alternativa 5, pois apresenta maior valor que a opção 2. Para a opção 5 a topologia da rede antes e depois da aplicação da metodologia já foi apresentada na Figura 19 redução é a mesma apresentada na TABELA 25.

Apesar de em alguns casos as alternativas de melhor solução se repetir com a variação dos pesos dos critérios, é possível notar que um critério atuando separadamente não corresponde completamente às expectativas desejadas para todos os casos. Para que se possa obter a confiança desejada na tomada de decisão torna-se imprescindível considerar múltiplos critérios na análise da solução. Na TABELA 39 é mostrada a comparação das soluções obtida com os diferentes análises dos pesos dos critérios.

TABELA 39  
Comparação das soluções analisando a importância de cada critério.

Análise	Solução	Redução: energia não suprida	Redução: consumidores interrompidos
Método proposto	5	28,67%	48,95%
Sem considerar Estimativa de especialistas	2	28,67%	48,95%
Apenas o critério de Energia Restabelecida	1	38,75%	27,12%
Apenas o critério de Chaves Comutadas	3	12,45%	21,21%
Apenas o critério de Consumidores Interrompidos	5	28,67%	48,95%



## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi apresentado o desenvolvimento de uma metodologia para a tomada de decisão multicritério aplicada ao restabelecimento automático de energia. A metodologia apresentada neste TCC será implementada em um software, “*ASE Restoration*”, o qual fornecerá ao sistema SCADA o conjunto de manobras de chaves que deve ser realizada para minimizar o impacto da contingência na rede de distribuição, executando o processamento das informações e definindo a melhor solução em um tempo menor que um minuto.

A metodologia foi construída de acordo com a necessidade da concessionária AES SUL, atendendo aos critérios discutidos e avaliados tanto pelo grupo de professores quanto pelos profissionais da concessionária envolvidos no projeto, consolidando uma ferramenta dedicada às características da rede da concessionária.

Em comparação a outros trabalhos encontrados na literatura, a metodologia se apresenta original para a solução do problema de restabelecimento da energia. Além da construção da solução utilizando o algoritmo de “*Bellman-Zadeh*”, para a tomada de decisão, e o método AHP, para definir e qualificar a opinião de especialistas, este trabalho considera as informações e a operação de equipamentos telecomandados, sendo este um diferencial entre os trabalhos voltados a solução deste tipo de problema.

Para demonstrar a metodologia, foi apresentado o estudo de um caso real de restabelecimento da energia simulando um defeito ocorrido na rede de distribuição da concessionária AES Sul. Também se apresentou a solução do problema sem a consideração da opinião dos especialistas e a análise individual de cada critério, comprovando a importância da utilização de métodos que contemplem múltiplos critérios.

### **Sugestões de Continuidade:**

- Avaliar o desempenho das soluções quando operando na rede de distribuição da concessionária;
- Integrar a informação de clientes prioritários na tomada de decisão, como hospitais e indústrias de laticínios;
- Agregar a análise financeira das opções de restabelecimento da energia, podendo ser definida como uma função objetivo;

- Estender a metodologia aplicada para otimizar a reconfiguração de redes de distribuição.

O desenvolvimento deste trabalho permitiu a publicação da metodologia em anais de eventos de iniciação científica e congressos, nacionais e internacionais, agregando uma experiência acadêmica essencial ao complemento da graduação. Os trabalhos publicados são listados abaixo.

- **Artigos completos publicados em periódicos**

SILVA, P. A. S., Bernardon, D. P., Reck, W. M., **Aplicação de Sistemas Inteligentes no Restabelecimento Automático da Energia**. ICCEEG – Revista Jr de Iniciação Científica em Ciências Exatas e Engenharia, Volume 1 – Número 2 – Agosto 2011, ISSN:2236-0093.

- **Trabalhos publicados em anais de eventos (completo)**

SILVA, P. A. S., BERNARDON, D. P., GARCIA, V. J., COMASSETTO, L., DAZA, E. F. B., SPERANDIO, M. Emprego de Redes Inteligentes para Restabelecimento Automático de Energia. Congresso Internacional de Distribuição de Energia - CIDEL, 2010, Buenos Aires.

BERNARDON, D. P., SPERANDIO, M., GARCIA, V. J., DAZA, E. F. B., COMASSETTO, L., SILVA, P. A. S. Metodologia para Restabelecimento de Energia Elétrica a partir de Chaves Telecomandadas. III Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos SBSE, 2010, Belém-Pará.

- **Trabalhos publicados em anais de eventos (resumo)**

SILVA, P. A. S., BERNARDON, D. P., MELLO, A. P. C., SILVA, C. V. M. Estratégias de Restabelecimento de Energia Considerando Múltiplos Critérios In: XXI Salão de Iniciação Científica/UFRGS - 2010, 2010, Porto Alegre - RS.

SILVA, P. A. S., BERNARDON, D. P., SILVA, C. V. M. Desenvolvimento de Sistemas Inteligentes para Operação de Equipamentos Telecomandados In: Mostra UNISINOS de Iniciação Científica, 2009, São Leopoldo - RS.

SILVA, P. A. S., GARCIA, V. J., Reck, W. M., MARKX, W. F., SILVA, J. G. Estratégias para Operação Automática de Equipamentos Telecomandados em redes de distribuição de energia elétrica In: XXI Salão de Iniciação Científica, 2009, Porto Alegre - RS.

SILVA, P. A. S., Bernardon, D. P., Reck, W. M. Sistemas Inteligentes Baseados em Algoritmos Multicriteriais para Operação Automática de Chaves Telecomandadas no Restabelecimento de Energia In: IX Salão Internacional de Iniciação Científica, 2009, Uruguaiana - RS.

- **Trabalhos publicados em anais de eventos (resumo expandido)**

SILVA, P. A. S., BERNARDON, D. P., Reck, W. M. Aplicação de Método AHP para a Tomada de Decisões Multicriteriais no Restabelecimento Automático de Energia In: XXIV Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnologia em Engenharia - CRICTE, 2010, Rio Grande - RS.

SILVA, P. A. S., BERNARDON, D. P., MELLO, A. P. C., Reck, W. M. Estratégia para Operação de Equipamentos Telecomandados no Restabelecimento da Energia Elétrica In: I Congresso de Iniciação Científica e Pós-Graduação - Sul Brasil, 2010, Florianópolis - SC.

SILVA, P. A. S., BERNARDON, D. P., Reck, W. M. Metodologia para o Restabelecimento Automático de Energia Baseado em Algoritmos Multicriteriais In: XXIII Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnologia em Engenharia - CRICTE, 2009, Joinville - SC.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**, 2010. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/visualizar\\_texto.cfm?idtxt=1877](http://www.aneel.gov.br/visualizar_texto.cfm?idtxt=1877)> Acesso em: 7 de junho de 2011.

ARANHA NETO, E.A.C.; SPERANDIO, M.; SICA, E.T.; COELHO, J.; CAMARGO, C.C.B.; RAMOS, R.; **Otimização Multicritério de Investimentos para Alocação de Chaves Automatizadas**. In: CIDEL- Congreso Internacional de Distribución Eléctrica, Buenos Aires, Argentina, 2006.

ASR, F.T. e A. KAZEMI., **Determining optimum location of automated switches in distribution network**. EPEC 2008 - Electric Power Conference, Canada, pg. 1-6, 2008.

BABU, P. R., KRISHNA, K.V., SHIRISHA, W., YASASVI, P. N., **Heuristic Search Strategy for Service Restoration Using DFS and BFS Techniques**. India International Conference Power Electronics (II CPE), January 2011.

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

BERNARDON, D. P., **Novos métodos para reconfiguração das redes de distribuição a partir de algoritmos de tomadas de decisão multicriteriais**. Tese de Doutorado, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, 2007.

BERNARDON, D. P., SPERANDIO, M.; GARCIA, V.J.; DAZA, E. F. B. ; COMASSETO, LORENZO; SILVA, P. A. S., **Metodologia para Restabelecimento de Energia Elétrica a partir de Chaves Telecomandadas**. In: SBSE 2010, 2010b, Belém. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2010.

BERNARDON, D.P., SPERANDIO, M., GARCIA, V.J., RUSSI, J., CANHA, L.N., ABAIDE, A.R., DAZA, E.F.B., **Methodology for allocation of remotely controlled switches in distribution networks based on a fuzzy multi-criteria decision making algorithm**. Electric Power Systems Research 81 pg. 414–420, 2010a.

BINGYIN, X., MENGYOU, G., SPITZER, E., **Self-healing of MV Distribution network Based on Distribution Control**. CIDEL – Congreso Internacional de Distribución Eléctrica, Buenos Aires, 2010. Paper: 59-28022010.

BINH, P. T. T., HA, N. H., TUAN, T. C., KHOA L. D., **Determination of Representative Load Curve based on Fuzzy K-Means**. The 4th International Power Engineering and Optimization Conf. (PEOCO2010), Shah Alam, Selangor, MALAYSIA: 23-24 June 2010

CHIGANER, L., RIBEIRO, A. M., MELLO, S. C. C. B. S., NETO, L. B. A., **Reforma do Setor Elétrico Brasileiro Aspectos Institucionais**. AGRNER 2002.

CIVANLAR, S., GRAINGER, J. J., YIN, H., LEE, S. S. H., **Distribution feeder reconfiguration for loss reduction**. IEEE Transmission Power System. Vol.3, n° 3, July 2006.

COX, P. W., **Self-healing Networks Performance Improvement by Automated Switching Algorithm**. 20th International Conference on Electricity Distribution, Prague, 8-11 June 2009.

EKEL, P. et al. **Models and methods of multicriterial decision making in a fuzzy environment and their applications**. Seventh International Fuzzy Systems Association World Congress, Prague, p.89-94, 1997.

ENSSLIN, L., NETO, M. G. e NORONHA, S., **Apoio à decisão – Metodologias para estruturação de problemas e avaliação multicritério de alternativas**, insular Florianópolis, Brasil (2001).

GONÇALVES, A. P.S., Salvador M., **O que são sistemas supervisórios?**, 2005, disponível em: [http://www.wectrus.com.br/artigos/sist\\_superv.pdf](http://www.wectrus.com.br/artigos/sist_superv.pdf).

HSIAO, Y. T., CHIEN, C. Y., **Enhancement of Restoration Service in Distribution Systems Using a Combination Fuzzy–GA Method**. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, n° 4, November 2000.

HSU, Y. Y. et al., **Distribution System Service Restoration Using a Heuristic Search Approach**. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, n°2, April 1992.

HUANG, C. M., **Multiobjective Service Restoration of Distribution Systems Using Fuzzy Cause-Effect Networks**. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, n° 2, MAY 2003.

HWANG, C. L. e YOON K., **Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications**, Springer – Verlag 1981, Berlin (Alemanha).

HWANG, C.L.; MASUD, A.S.M. **Multiple Objective Decision Making – Methods and Applications**. New York, Springer-Verlag, 1979.

INAGAKI, J., NAKAJIMA, J., HASEYAMA, M., A., **Multi-objective Service Restoration Method for Power Distribution Systems**. Circuits and Systems. ISCAS 2006. Proceedings. 2006 IEEE International Symposium pg.4.

KUMAR, Y., DAS, B., SHARMA, J., **Multiobjective, Multiconst Raint Service Restoration of Electric Power Distribution System With Priority Customers**. IEEE Transactions on Power Systems Delivery, Vol. 23, n° 1, January 2008.

LIANG, G. e WANG M., **A Fuzzy Multi-criteria Decision Method for Facility Selection**, International Journal of Production Research 1991, vol. 29, n. 11, p. 2313-1330.

LIU, D., CHEN, Y., YUAN, R., SHEN, G., **Backtracking Based Algorithm in Hierarchical Time-extended Petri Net Model for Power System Restoration**. The 7th International Power Engineering Conference, 2005.IPEC 2005.

- MACLEMAN, D., BIK, W., JONES, A., **Evaluation of a Self-Healing Distribution Automation Scheme on the Isle of Wight**. 20th International Conference on Electricity Distribution. Paper 0178. Prague, 8-11 June 2009.
- MCDERMOTT, T. E., DREZGA, I., BROADWATER, R. P., **A Heuristic Nonlinear Constructive Method for Distribution System Reconfiguration**. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, n° 2, May 1999.
- MORELATO, L., MONTICELLI, A., **Heuristic Search Approach to Distribution System Restoration**. IEEE Transaction on Power Delivery, Vol4, n° 4, p.2235-2241, Oct. 1989.
- PAMPLONA, E. O., **Avaliação Qualitativa de Cost Drivers pelo método AHP**. VI ABCustos, São Paulo (SP), julho de 1999.
- PEDRYCZ, W., EKEL, P., PARREIRAS, R., **Fuzzy Multicriteria Decision-Making: Models, Methods and Applications**. Ed. John Wiley and Sons, 2011.
- RAVIBABU, P., VENATESH, K., KUMAR, C.S., **Implementation of genetic algorithm for optimal network reconfiguration in distribution systems for load balancing**. IEEE Region 8 SIBIRCON 2008, pg. 124-128.
- SAATY, T. L., **Decision making with the analytic hierarchy process**. Service Science. Vol. 1, No. 1, 83-98, 2008.
- SAATY, T. L., **Decision Making for Leaders: The Analytic Hierarchy Process for Decisions in complex World**. 2° ed. Pittsburg, Pa: University of Pittsburgh, 1990.
- SAATY, T. L., OZDEMIR, M. S. **Why the Magic Number Seven Plus or Minus Two. Mathematical and Computer Modeling**. Vol. 38. Pg 233-244, 2003.
- SAATY, T. L., TRAN, L. T., **On the invalidity of fuzzifying numerical judgments in the Analytic Hierarchy Process Mathematical and Computer Modelling**. Vol. 46. Pg 962-975, 2007.
- SAATY, T. L., VARGAS, L. G., **Dispersion of Group Judgments**. ISAHP 2005 – VIII International Symposium on the Analytic Hierarchy Process, Honolulu, Hawaii, 2005.
- SAATY, T. L., **A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures**, Journal of Mathematical Psychology, 1977, vol. 15, p. 234-281.
- SAATY, T. L., **Decision Making With Dependence And Feedback: The Analytic Network Process**, RWS Publications, Pittsburgh/PA (EUA), 1996.
- SICA, E. T., CAMARGO, C. C. de B., **Multicriteria Optimization in Power Transmission Planning: A Case Study**. In: Conference Proceedings of Power-Gen Latin America. São Paulo. 2003.
- SHIRMOHAMMADI, D., **Service Restoration in Distribution Networks via Networks Reconfiguration**. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, n° 2, April 1992.

SALOMON, V. P.; MONTEVECHI, J. A. B.; PAMPLONA, E. O., **Justificativas para Aplicação do Método de Análise Hierárquica**. 19° ENEGEP. Rio de Janeiro, RJ, 1999.

TOUNE, S., FUDO, H., GENJI, T., FUKUYAMA, Y., NAKANISHI, Y., **Comparative Study of Modern Heuristic Algorithms to Service Restoration in Distribution Systems**. IEEE Transactions on Power Systems Delivery, Vol. 17, n° 1, JANUARY 2002.

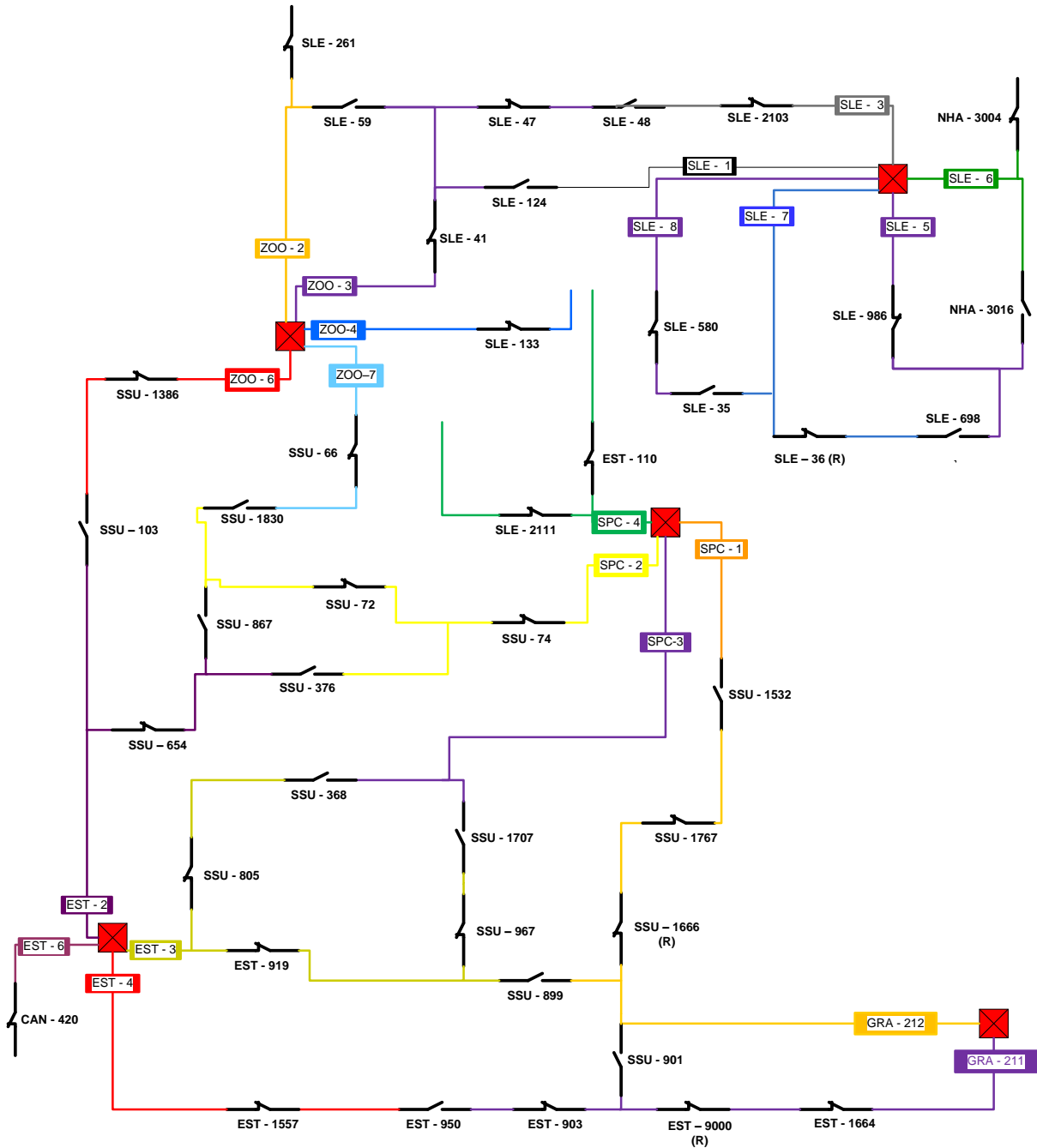
TRANTAPHYLLOU, E., **Multi-criteria decision making methods: a comparative study**. Springer, 2000. 288 p. (Volume 44 de Applied optimization). ISBN 0792366077, 9780792366072.

WANG, Y., SUN, Y., GENG, X., WU, X., **Research of AHP Model on Combination between the Social Responsibility and the Economic Benefits in Corporation**. Business and Information Management. International Seminarn, Dec. 2008

WOLFF, C. S., **O método AHP – revisão conceitual e proposta de simplificação**. Rio de Janeiro, 2008. 138p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

## APÊNDICE I

Diagrama Unifilar das chaves Telecomandadas instaladas na rede de distribuição de energia da concessionária AES SUL.





## APÊNDICE II

Código em MATLAB® para obtenção dos valores dos índices de prioridade dos critérios a partir da comparação par a par.

```

%Rotina para a determinação do autovetor, máximo autovalor e análise de
%consistência da comparação par a par do método AHP. Análise três
%julgamentos realizados por especialistas.
%Foi utilizada a função "eig" para calcular o autovalor e autovetor da
%matriz de comparações para a resposta de cada especialista. A resposta
%é fornecida por meio de duas variáveis "V" e "D", onde "D" é uma matriz
%diagonal com todos os autovalores da matriz de comparações e "V" é também
%uma matriz contendo, em cada coluna, o autovetor associado ao autovalor da
%matriz diagonal "D".
clc
clearall

a=[1 1 5;1 1 5;1/5 1/5 1];%Matriz de comparação Especialista 1
b=[1 7 1;1/7 1 1/7;1 7 1];%Matriz de comparação Especialista 2
c=[1 5 1/2;1/5 1 1/7;2 7 1];%Matriz de comparação Especialista 3

disp('////////////////////////////////////')
disp('/////////////////////////////////Estimativa Especialista 1////////////////////////////////')
[V1,D1]=eig(a);
n=length(a(:,1));%n: número de critérios
RC1=((D1(2,2)-n)/(n-1))/0.52;
RIC=0.05;%limite máximo do valor de RC
if RC1 <= RIC%testa se o valor de RC1 é menor que o valor máximo aceitável

disp('Máximo Autovalor')
disp (D1(2,2))
disp('RC =')
disp(RC1)
disp('matriz consistente')
disp('Autovetor associado ao máximo autovalor')
    P1=V1(:,2)/sum(V1(:,2))
%P1: autovetor normalizado, associado ao máximo autovalor D1(2,2)
else
disp('matriz inconsistente')
disp('Máximo Autovalor')
disp (D1(2,2))
disp('RC =')
disp(RC1)
end
disp('////////////////////////////////////')
disp('/////////////////////////////////Estimativa Especialista 2////////////////////////////////')
[V2,D2]=eig(b);
n=length(b(:,1));
RC2=((D2(2,2)-n)/(n-1))/0.52;
if RC2 <= RIC%testa se o valor de RC2 é menor que o valor máximo aceitável

disp('Máximo Autovalor')
disp (D2(2,2))
disp('RC')
disp(RC2)
disp('matriz consistente')
disp('Autovetor associado ao máximo autovalor')
    P2=V2(:,2)/sum(V2(:,2))

```

```

else
disp('matriz inconsistente')
sp('Máximo Autovalor')
disp (D2 (2,2))
disp('RC')
disp(RC2)
end
disp('////////////////////////////////////')
disp('/////////////////////////////////Estimativa Especialista 3////////////////////////////////')

[V3,D3]=eig(c);
n=length(c(:,1));
RC3=((D3(1,1)-n)/(n-1))/0.52;
if RC3 <= RIC

disp('Máximo Autovalor')
disp (D3 (1,1))
disp('RC')
disp(RC3)
disp('matriz consistente')
disp('Autovetor associado ao máximo autovalor')
P3=V3(:,1)/sum(V3(:,1))
else
disp('matriz inconsistente')
disp('Máximo Autovalor')
disp (D3 (1,1))
disp('RC')
disp(RC3)
end

M_Int=(a.*b.*c).^(1/3);

disp('////////////////////////////////////')
disp('/////////////////////////////////Matriz Integralizada////////////////////////////////')
M_Int

[V_int,D_int]=eig(M_Int);
n=length(M_Int(:,1));
RC_int=((D_int(1,1)-n)/(n-1))/0.52;
ifRC_int<= RIC

disp('MáximoAutovalor')
disp (D_int (1,1))
disp('RC')
disp(RC_int)
disp('matriz consistente')
disp('Autovetor associado ao máximo autovalor')
P_int=V_int(:,1)/sum(V_int(:,1))
else
disp('matriz inconsistente')
disp('Máximo Autovalor')
disp (D_int (1,1))
disp('RC')
disp(RC_int)
end

```