

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

**UTILIZAÇÃO DA METODOLOGIA AHP PARA ALOCAÇÃO
DE EQUIPAMENTOS TELECOMANDADOS EM SISTEMAS
DE DISTRIBUIÇÃO PARA MELHORIA DA CONFIABILIDADE**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Eric Fernando Boeck Daza

Santa Maria, RS, Brasil

2010

UTILIZAÇÃO DA METODOLOGIA AHP PARA ALOCAÇÃO DE EQUIPAMENTOS TELECOMANDADOS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO PARA MELHORIA DA CONFIABILIDADE

por

Eric Fernando Boeck Daza

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia, Centro de Estudos em Energia e Meio Ambiente (CEEMA) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Elétrica.**

Orientadora: Prof^a. Dra. Alzenira da Rosa Abaide

Santa Maria, RS, Brasil

2010

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

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

**UTILIZAÇÃO DA METODOLOGIA AHP PARA ALOCAÇÃO DE
EQUIPAMENTOS TELECOMANDADOS EM SISTEMAS DE
DISTRIBUIÇÃO PARA MELHORIA DA CONFIABILIDADE**

elaborada por
Eric Fernando Boeck Daza

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica

COMISSÃO EXAMINADORA

Alzenira da Rosa Abaide, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientadora)

Daniel Pinheiro Bernardon, Dr. (UNIPAMPA)

Ghendy Cardoso Junior, Dr. (UFSM)

Santa Maria, dia 22 de Setembro de 2010.

Dedico esta dissertação a Daiane,
minha esposa, e a minha família, pelo
apoio e incentivo durante esse trabalho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a minha esposa Daiane por todo o suporte, paciência e energia transmitida durante a realização dessa dissertação. Somente com seu auxílio e carinho foi possível a conclusão desse trabalho.

A minha família, que estando longe ou perto sempre se mantiveram dando seu apoio incondicional durante todas as etapas do mestrado.

À Coordenação, aos professores e aos funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria, em especial aos Profs. Alzenira da Rosa Abaide, Luciane Neves Canha, Felix Farret e a Ghendy Cardoso Junior, pelo apoio e profissionalismo.

Gostaria de agradecer em especial a Alzenira da Rosa Abaide pelo seu constante apoio e motivação, sua compreensão e orientações prestadas. Sua experiência profissional e acadêmica, sempre foram pilares que me auxiliaram no meu crescimento profissional e pessoal, que com sua cativante força de vontade foram não apenas necessários, mas sim essenciais para minha maturação como profissional. Sua atuação profissional será sempre uma referência a ser buscada.

Aos colegas e amigos da UFSM e CEEMA, pelo auxílio durante o trabalho. Meu obrigado ao colega Nelson Knak, por sua pronta ajuda em aspectos burocráticos, documentação e informações. Ao colega Breno Wottrich, pela constante troca de idéias e incentivos.

Aos colegas e amigos Eng. Daniel Bernardon e Eng. Lorenzo Comassetto, que me ajudaram na busca de soluções.

Aos gestores da Empresa AES Sul Distribuidora Gaúcha de Energia S. A., Lorenzo Comassetto e Elso Nogueira, por terem me proporcionado condições para a realização do curso.

Por fim, a todos aqueles que, de algum modo, contribuíram para a realização deste trabalho.

*“Hay que endurecerse,
pero sin perder la ternura jamás.”*

Ernesto Guevara de la Serna

RESUMO

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

UTILIZAÇÃO DA METODOLOGIA AHP PARA ALOCAÇÃO DE EQUIPAMENTOS TELECOMANDADOS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO PARA MELHORIA DA CONFIABILIDADE

AUTOR: ERIC FERNANDO BOECK DAZA

ORIENTADORA: ALZENIRA DA ROSA ABAIDE

Local e Data da Defesa: Santa Maria, 22 de Setembro de 2010.

Em empresas de sistemas de potência a confiabilidade é uma preocupação constante. Nesse novo contexto, algumas soluções têm sido desenvolvidas e pesquisadas como alternativa para melhorar sua performance em propiciar um retorno do fornecimento de energia elétrica aos seus consumidores quando estes estão desenergizados. Dentre as soluções possíveis, a instalação de chaves telecomandadas tem representado uma solução cada vez mais adotada por várias empresas de energia devido ao seu custo benefício. Na alocação desses equipamentos é essencial considerar diferentes critérios e características, desta maneira o uso de uma metodologia de decisão multicriterial é necessário e especialmente para permitir a mensuração da opinião de especialistas do setor de sistemas de distribuição. Então, o objetivo desse trabalho é propor uma nova metodologia de alocação desses dispositivos em sistemas de distribuição de energia baseado na metodologia de tomada de decisão AHP - *Analytic Hierarchy Process* para validação das melhores localizações para instalar esses equipamentos. A grande contribuição e inovação desse trabalho consiste apresentar uma metodologia de alocação desses equipamentos, uma validação da opinião dos especialistas, descartando aquelas que apresentam uma baixa consistência e desta forma tornando a resposta final mais exata e de acordo com o proposto, através de uma variação da metodologia AHP.

Palavras-chave: AHP, Análise Multicriterial, Chaves Telecomandadas, Confiabilidade em Sistemas de Distribuição, Sistemas de Distribuição.

ABSTRACT

**Master Thesis
Post-Graduation Program in Electrical Engineering
Federal University of Santa Maria**

USE FOR AHP METHODOLOGY FOR ALLOCATION OF REMOTELY-CONTROLLED DEVICES IN POWER DISTRIBUTION SYSTEMS FOR INCREASE RELIABILITY

AUTHOR: ERIC FERNANDO BOECK DAZA

TUTOR: ALZENIRA DA ROSA ABAIDE

Santa Maria, September 22, 2010.

In power utilities the subject reliability is a permanent worry. In this new context, some solutions have been developed and researched to an alternative to improve the performance on service restoration when there are consumers without power supply. Among possible solutions the installation of remotely-controlled switches represents a solution that has been adopted by many companies due its cost benefit. The allocation of these devices is essential to assess the different criterions and characteristics, so the use of multi-criteria decision making to evaluate these characteristics and especially to allow the measurement of expert's opinion in power distribution systems is essential. Therefore, the objective of this work is to propose a new methodology for the allocation of these devices in electric distribution systems based on AHP - Analytic Hierarchy Process decision making for validation of the best locations to install theses device. The contribution and innovation of this work consist in adding to the allocation methodology a validation of expert opinion, discarding those that present a very low consistency and thus making the final answer more exact and in accordance with the proposal, through a variation of the AHP methodology.

Keywords: AHP, multi-criteria analysis, Power distribution, Power distribution reliability, Remotely-controlled switches.

LISTA DE ABREVIATURAS

AHP: Analytic Hierarchy Process

AL: Alimentador

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

Ch: Chave

DEC: Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora

DIC: Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora

DJ: Disjuntor

DMIC: Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora

DNAEE: Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica

ENS: Energia Não Suprida

FEC: Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora

FIC: Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora

IC: Índice de Consistência

IR: Índice Randômico de Consistência

NA: Normalmente Aberto

NF: Normalmente Fechado

ONS: Operador Nacional do Sistema

RC: Razão da Consistência

RF: Resposta Final

SAIDI: System Average Interruption Duration Index

SAIFI: System Average Interruption Frequency Index

SE: Subestação

ti: tempo de isolamento

tr: tempo de reparo

tt: tempo de transferência

tta: tempo de transferência automático

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Diagrama unifilar de uma subestação com dois alimentadores radiais simplificados de acordo com (Kagan, et. al., 2005)	21
Figura 3.1: Representação do fluxo de carga da topologia considerada.....	32
Figura 3.2: Topologia de uma rede de distribuição de energia elétrica real	33
Figura 3.3: Exemplo de uma Topologia real para formatação da MLE.	37
Figura 3.4: Exemplo de uma chave fusível.....	43
Figura 3.5: Exemplo de uma chave repetidora.	43
Figura 3.6: Exemplo de um religador digital.	44
Figura 3.7: Exemplo de uma chave faca.....	45
Figura 3.8: Exemplo de uma chave sob carga.	45
Figura 3.9: Exemplo de uma chave telecomandada.	46
Figura 4.1 - Estrutura de três níveis no processo de hierarquização conceitual para análises.	50
Figura 4.2 - Questionário padrão proposto para julgamento de critérios da ferramenta desenvolvida.	53
Figura 4.3 –Exemplo de preenchimento do questionário proposto da ferramenta desenvolvida.	54
Figura 5.1 –Sistema de distribuição de energia simplificado.	69
Figura 6.1 – Alimentador CIN-03 que será avaliado.....	78
Figura 6.2 –Alimentador CIN-03 e adjacentes CIN-09 e CIN-10.....	79
Figura 6.3 – Questionário de análise dos pesos do especialista 1.....	84
Figura 6.4 – Matriz de comparação, autovetor e autovalores 1.....	84
Figura 6.5 – Pesos de cada critério.	84
Figura 6.6 – Análise da consistência das informações.	85
Figura 6.7 – Questionário de análise dos pesos do especialista 2.....	85
Figura 6.8 –Matriz de comparação, autovetor e autovalores 2.....	85
Figura 6.9 –Matriz de comparação, autovetor e autovalores 2.....	86
Figura 6.10 – Análise da consistência das informações 2.	86
Figura 6.11 –Questionário de análise dos pesos do especialista 3.....	86
Figura 6.12 – Matriz de comparação, autovetor e autovalores 3.....	87
Figura 6.13 – Pesos de cada critério 3.	87
Figura 6.14 – Análise da consistência das informações 3.	87
Figura 6.15 – Questionário de análise dos pesos do especialista 4.....	88
Figura 6.16 – Matriz de comparação, autovetor e autovalores 4.....	88
Figura 6.17 – Pesos de cada critério 4.	88
Figura 6.18 – Análise da consistência das informações 4.	88
Figura 6.19 – Avaliação da opinião de todos os especialistas.	89
Figura 6.20 – Matriz de comparação integralizada e seu autovetor e autovalores.	90
Figura 6.21 – Pesos finais de cada critério.	90
Figura 6.22 – Análise da consistência final das informações.	90
Figura 6.23 – Valores máximos de cada critério.	91
Figura A.1: Topologia de rede com a representação das características α_r e β_r	105
Figura A.2: Representação das características α_n e β_n da topologia de rede de distribuição apresentada.....	106

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 3.1 - Conjunto de nós considerando o valor de contribuição de corrente de cada nó.	31
Quadro 3.2 – Conjunto de ramos acrescido dos valores iniciais de corrente de cada ramo através característica β_n .	31
Quadro 3.3 – Conjunto de ramos acrescido dos valores iniciais de corrente de cada ramo através característica β_n .	32
Quadro 3.4 – Conjunto de nós para a topologia de rede proposta.	34
Quadro 3.5 – Conjunto de ramos para a topologia de rede proposta.	34
Quadro 3.6 – Acréscimo no conjunto dos ramos os valores de tensão.	35
Quadro 3.7 – MLE considerando o tipo de equipamento e atuação das chaves de manobra e chaves de proteção.	39
Quadro 3.8 – MLE integralizada com os tempos e a taxa de falhas de cada trecho.	39
Quadro 3.9 – MLE considerando apenas a taxa de falhas de cada trecho para o cálculo do FEC.	41
Quadro 4.1 – Representação numérica para comparações e julgamentos verbais.	51
Quadro 4.2 – Valores do índice randômico de consistência conforme Saaty (2007).	63
Quadro 5.1 – MLE integralizada do sistema simplificado.	70
Quadro 5.2 – MLE integralizada do sistema com a instalação de equipamentos telecomandados nos pontos NF e NA.	71
Quadro 6.1 – Resumo dos alimentadores avaliados.	80
Quadro 6.2 – Resultado da análise para instalação de pares de equipamentos telecomandados.	81
Quadro 6.3 –Lista resumida dos resultado da análise.	82
Quadro 6.4 – Soluções com critérios normalizados.	91
Quadro 6.5 – Soluções com critérios normalizados e com pesos.	91
Quadro 6.6 – Priorização de todas as soluções de acordo com seu índice final.	92
Quadro A.1 - Conjunto dos ramos para a topologia apresentada.	105
Quadro A.2 - Conjunto dos nós para a topologia apresentada.	105

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A – Representação da Topologia das Redes de Distribuição.....	103
ANEXO B – Topologia da rede analisada – CIN - 03	108
ANEXO C – Interrupções no sistema analisado	112

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1. Objetivos desta dissertação.....	17
1.2. Organização dos Capítulos.....	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1. Sistemas de Distribuição.....	19
2.2. Confiabilidade em Sistemas de Distribuição.....	21
2.3. Indicadores de Confiabilidade	23
2.4. Alocação de Chaves de Manobra	24
2.5. Análise Multicriterial	25
2.6. Metodologia Proposta pelo Autor.....	27
3. MODELAGEM E FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROBLEMA	29
3.1. Fluxo de Potência em Sistemas de Distribuição.....	29
3.2. Cálculo de Indicadores de Continuidade.....	35
3.2.1. MLE – Matriz Lógico Estrutural	36
3.2.2. Cálculo do Indicador DEC	38
3.2.3. Cálculo do Indicador ENS.....	40
3.2.4. Cálculo do Indicador FEC	41
3.3. Equipamentos de Manobra e Proteção	42
3.3.1. Chaves Fusíveis.....	42
3.3.2. Chaves Repetidoras	43
3.3.3. Religadores	44
3.3.4. Chaves Faca	44
3.3.5. Chaves com Abertura Sob Carga	45
3.3.6. Equipamentos de Manobra Telecomandados	45
4. ANÁLISE MULTICRITERIAL: ANALYTIC HIERARCHY PROCESS (AHP)	47
4.1. Introdução ao Analytic Hierarchy Process (AHP).....	48
4.2. Formalização Inicial do Problema	49
4.2.1. Objetivo Final ou Meta.....	49
4.2.2. Avaliação dos Critérios e Soluções	49
4.2.3. Julgamentos.....	50
4.3. Solução Matemática do Problema.....	56
4.4. Solução Aproximada.....	58
4.5. Medida de Inconsistência das Informações	60
4.6. Integralização de julgamentos.....	64
5. ALOCAÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE MANOBRA TELECOMANDADOS.....	66
5.1. Definições Iniciais.....	66
5.2. Algoritmo de Alocação Chaves Telecomandadas	68

5.3. Priorização das Soluções.....	72
6. RESULTADOS PRÁTICOS E DISCUSSÃO.....	77
6.1. Alocação dos Equipamentos Telecomandados.....	77
6.2. Análise Multicriterial com o AHP.....	82
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	94
7.1. Contribuições.....	95
7.2. Artigos Publicados.....	95
7.3. Sugestões para Continuidade do Trabalho.....	96
ANEXO A – Representação da Topologia das Redes de Distribuição.....	103
ANEXO B – Topologia da rede analisada – CIN - 03.....	108
ANEXO C – Interrupções no sistema analisado.....	112

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas o setor energético do Brasil passou por diversas mudanças, transitando de um modelo estatal e estático para um modelo mais livre e com forte regulação e que teve a entrada de novos agentes principalmente do setor privado. Esse novo sistema mais regulado tornou o mercado mais justo e ao mesmo tempo mais competitivo, forçando principalmente as concessionárias de distribuição de energia elétrica a mudanças em sua estrutura de negócios e de tomadas de decisões sobre os investimentos a serem realizados.

No estado do Rio Grande do Sul, essa mudança no setor ficou caracterizada pelas privatizações ocorridas no setor de distribuição, com a divisão da CEEE - Companhia Estadual de Energia Elétrica em três grandes regiões, sendo que uma destas permaneceu com a CEEE e as outras duas foram divididas entre a RGE – Rio Grande Energia e AES Sul.

Nesse novo cenário, um dos maiores desafios das empresas distribuidoras tem sido a busca por um alto nível de confiabilidade de seus sistemas e principalmente de continuidade no fornecimento de energia elétrica aos seus consumidores. Tradicionalmente em todo o mundo, esses níveis de confiabilidade mínimos são estabelecidos por órgãos reguladores do setor. No Brasil a responsabilidade dessa regulação cabe a ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, que inicialmente através da resolução número 024 de 27 de janeiro de 2000 (ANEEL, 2000) definiu as disposições a cerca dos níveis de continuidade nos sistemas de distribuição de energia elétrica, estabelecendo metas de controle mensais, trimestrais e anuais para a área de concessão da empresa, para grupos de clientes e clientes individualmente. Para mensurar esse controle a ANEEL definiu diversos indicadores, dentre os quais se destacam os que tratam da Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC), Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora (DIC), Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora (DMIC), Freqüência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC) e Freqüência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora (FIC).

Um desempenho de baixa performance nos indicadores de continuidade afeta diretamente o desempenho financeiro e operacional da concessionária de energia, pois implicam em energia não faturada, custos sociais e de imagem da empresa perante seus consumidores e principalmente quando essa performance significar a violação dos limites de continuidade estabelecidos pela ANEEL implicando em elevadas penalidades financeiras.

Sob o ponto de vista do consumidor a interrupção de energia agrega um custo financeiro não tão alto quando comparado ao custo social que esta representa. Já sob a tutela da empresa de distribuição de energia deve pesar o fato de que proporcionar um serviço de fornecimento de energia o mais contínuo possível, sendo este um dos objetivos que a empresa deve buscar. Com a recente universalização do fornecimento de energia elétrica, cada vez mais os sistemas de distribuição se tornam mais extensos, assim evitar as causas e efeitos de cada interrupção torna-se difícil, exigindo da empresa constantes investimentos em seu sistema de distribuição para minimizar esses impactos. Assim soluções mais completas vêm sendo adotadas pelas empresas. Com o intuito de flexibilizar a operação de seu sistema a concessionária pode obter alternativas operacionais através de obras de inserção de novos trechos de redes, construção de novos alimentadores para ampliar as possibilidades de transferência de carga. Também a instalação de equipamentos de proteção para isolar os trechos de rede defeituosos, a instalação de equipamentos de manobra telecomandados para aperfeiçoar o seccionamento e a transferências de carga, permitindo a supervisão em tempo real de equipamentos e subestações, entre outras soluções. Mas quaisquer destas opções requerem investimentos significativos para se obter um resultado positivo, assim as empresas estão em constante busca para melhor alocar os recursos disponíveis para produzirem as melhores alternativas operacionais e financeiras.

Dentre as soluções citadas, a instalação de equipamentos de proteção e manobra telecomandados representa uma solução que vem sendo adotada por muitas empresas devido a sua boa relação custo benefício. Pois, as alocações adequadas desses equipamentos em locais estratégicos em alimentadores de baixa performance auxiliarão em uma rápida isolação de regiões com defeitos, bem como a transferência de montantes de carga para outros alimentadores adjacentes quando desejado. Possibilitando, assim, que o tempo de interrupção fique restrito apenas a um grupo reduzido de consumidores e adicionalmente possibilitando a

reconfiguração do alimentador afetado com transferências de clientes para os alimentadores adjacentes, permitindo uma redução nos indicadores de continuidade do alimentador como um todo.

1.1. Objetivos desta dissertação

Nesta dissertação propõe-se determinar a melhor forma de alocar equipamentos de manobra sob carga telecomandados com recursos financeiros e de materiais limitados, visando à redução nos indicadores de continuidade nos sistemas de distribuição e estabelecendo uma priorização das soluções possíveis de acordo com os critérios pré-determinados.

Na alocação de equipamentos de manobra sob carga telecomandada o objetivo é possibilitar manobras nas redes de distribuição sem a necessidade de deslocar equipes para realizar a abertura e fechamento físico dos equipamentos em campo. Desta forma é possível eliminar o tempo de deslocamento de equipes até as chaves de manobra, permitindo assim uma minimização dos indicadores de continuidade associados à duração do tempo sem energia, como o DEC, DIC e DMIC.

Assim para desenvolver esse trabalho foram abordados alguns tópicos relevantes:

- 1) Modelagem de parâmetros de redes de distribuição;
- 2) Algoritmo para representação computacional de topologia elétrica das redes de distribuição e fluxo de potência;
- 3) Modelagem e estratégia de operação de equipamentos de manobra telecomandados;
- 4) Metodologia para tomada de decisão multicriterial AHP - *Analytic Hierarchy Process*;
- 5) Desenvolvimento de algoritmo e software para alocação de equipamentos de manobra telecomandados nas redes de distribuição;
- 6) Aplicação do sistema computacional para a análise de redes de distribuição reais;
- 7) Análise dos resultados obtidos e conclusões.

1.2. Organização dos Capítulos

Esta dissertação é composta por sete capítulos. Divididos da seguinte forma:

No primeiro, é abordada uma visão geral sobre os sistemas de potência e suas recentes mudanças, focando posteriormente na continuidade do serviço de fornecimento de energia e maneiras de mitigá-los; em seguida apresenta-se a proposta deste trabalho e suas aplicações.

No segundo, é realizada uma revisão bibliográfica dos sistemas de distribuição típicos, da análise de confiabilidade em sistemas de distribuição e seus principais indicadores, a abordagem do problema de alocação de equipamentos de manobra e os métodos de análise multicriterial utilizados e finalmente os métodos propostos pelo autor.

No terceiro, é realizada a modelagem matemática do problema proposto, apresentando os algoritmos utilizados para representação da topologia de rede, cálculo de fluxo de potência, avaliação dos indicadores de continuidade e uma apresentação dos principais equipamentos de manobra e proteção.

No quarto, é abordada a metodologia de análise multicriterial escolhida, seus benefícios, formalização, metodologias e suas características principais. Neste trabalho é utilizado a *Analytic Hierarchy Process (AHP)*.

No quinto, é apresentada a metodologia utilizada para alocação dos equipamentos telecomandados, os meios utilizados para determinar os benefícios de sua instalação e a maneira de realizar a priorização de todas as soluções.

No sexto, é verificada a aplicação de toda a metodologia através de um exemplo prático que permitirá validar todo o algoritmo proposto.

No sétimo, são as conclusões verificadas no trabalho, as contribuições que o trabalho proporciona e as sugestões de continuidade do trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nos últimos anos muitas pesquisas tem sido conduzidas referentes à análise e otimização dos níveis de confiabilidade em sistemas de distribuição e maneiras de reduzir seus impactos econômicos e sociais, sendo interessante revisar alguns conceitos sobre o assunto e sobre sistemas de distribuição de energia.

2.1. Sistemas de Distribuição

Com as mudanças ocorridas nos sistemas de potência a partir da década de 90 com a concepção do modelo do sistema elétrico, os sistemas de potência devido a sua magnitude e nível de importância passaram a ser dividido e tratado em dois grandes grupos: rede básica do sistema interligado nacional e sistemas de distribuição de energia. Os elementos que compõem a rede básica do sistema interligado nacional foram inicialmente estabelecidos pela portaria 244 / 1996 do DNAEE – Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica, a atual ANEEL (DNAEE, 1996), sem uma associação conceitual em comum, contendo uma lista de elementos que fariam parte a partir daquele momento da rede básica, porém em geral é possível verificar que pertence a rede básica as linhas de transmissão com operação em nível de tensão em valores iguais ou superiores a 230 kV, ou seja, níveis de tensão em corrente alternada típicos de 230 kV, 345 kV, 440 kV, 525 kV e 750 kV e ainda linhas de 600 kV em corrente continua entre outros níveis e suas respectivas subestações de suprimento e carga. De maneira geral, as instalações da rede básica são equipamentos pertencentes às transmissoras de energia e alguns complexos e relevantes grupos geradores. Já os sistemas de distribuição constituem-se do restante do sistema, ou seja, são aquelas instalações e equipamentos pertencentes a uma concessionária ou a uma permissionária de distribuição de energia, de acordo com os procedimentos de rede do ONS – Operador Nacional do Sistema aprovados pela resolução 372 / 2009 da ANEEL (ANEEL, 2009).

O sistema de distribuição de energia típico tem como principal função entregar a energia elétrica do sistema da rede básica ao consumidor final. Tomando como base os procedimentos da distribuição definidos pela ANEEL (ANEEL, 2010) a concessionária de energia subdivide seus clientes de acordo com seu nível de tensão de fornecimento, sendo clientes de alta tensão quando suprido por tensão igual ou superior a 69 kV, clientes de média tensão quando suprido por tensão maior que 1 kV e menor que 69 kV e por fim clientes de baixa tensão com suprimento em tensão inferior a 1 kV. Baseado nisso considerando sistemas de distribuição de energia denomina-se como alta tensão valores típicos de 69 kV, 88 kV, 138 kV e entre outros, que internamente muitas concessionárias denominam de subtransmissão. Da mesma forma denomina-se como média tensão ou tensão primária os valores típicos de 44, 35, 23,1, 13,8 e 11 kV e entre outros. E, por conseguinte a baixa tensão ou tensão secundária consiste de valores típicos de 440, 380, 220 e 110 V entre outros. Desta forma, têm-se grandes extensões de redes de subtransmissão em um sistema de distribuição com o objetivo de suprir o maior número possível de subestações (SE's) que por consequência alimentarão redes de média tensão e baixa tensão e que por fim proporcionarão ao consumidor o fornecimento de energia elétrica desejado.

A partir das SE's o suprimento em média tensão normalmente consiste em circuitos simples denominados de alimentadores. Um alimentador (AL) opera em tensão primária e supre os transformados de distribuição existentes e que por sua vez suprem redes secundárias operando em baixa tensão e alimentando clientes nesta classe de tensão.

Em geral uma subestação supre diversos alimentadores, normalmente limitando o número de alimentadores por subestação a disposição geográfica desta e a sua capacidade nominal (limitado essa por questões construtivas e mensurada em MVA). A operação dos alimentadores atualmente é predominantemente radial, ou seja, o fluxo de potência parte da barra da subestação até a carga distribuída no alimentador em um único sentido, sempre na direção subestação - carga. Tal sistema de operação é o mais comum devido à baixa complexidade de construção e operação. A Figura 2.1 apresenta um modelo de uma subestação com dois alimentadores radiais, representando alguns elementos mais simples e básicos tais como: disjuntor (DJ) de saída de cada alimentador, equipamentos de manobra normalmente fechados (NF), equipamentos de manobra conectando os dois

alimentadores em posição normalmente aberta (NA), chaves de proteção, como chaves fusíveis.

Os alimentadores, como demonstrado na Figura 2.1, contam sempre com um tronco principal do qual podem derivar ramais que normalmente são protegidos por chaves fusíveis. Também possuem chaves (Ch) para manobra e seccionamento de rede de distribuição que operam em posição NF que servem para isolar blocos de carga para eventuais necessidades de manutenção. Já as chaves NA podem ser utilizadas quando for necessário efetuar alguma transferência de carga, conforme apresenta (Kagan, et al., 2005).

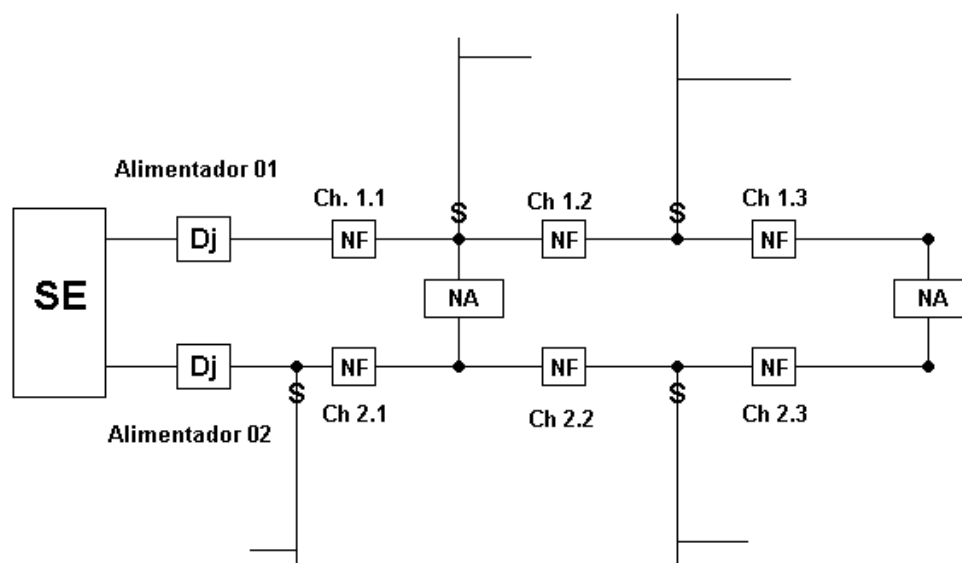


Figura 2.1 - Diagrama unifilar de uma subestação com dois alimentadores radiais simplificados de acordo com (Kagan, et. al., 2005)

2.2. Confiabilidade em Sistemas de Distribuição

Confiabilidade é uma das características mais importante em um sistema elétrico de potência, principalmente em sistemas de distribuição que apresentam o maior número de falhas. Confiabilidade em sistemas de distribuição pode ser definida como a qualidade de manter a operação e fornecimento de energia por um determinado tempo e com o mínimo de falhas nos equipamentos que o compõem, falhas essas que são inerentes a qualquer sistema com o decorrer do tempo.

De maneira geral, falhas em sistemas de potência de grande porte tendem a causar desligamentos de grande porte, ocasionando a interrupção de regiões inteiras, porém sua frequência é menor. Já em sistemas de distribuição o impacto de falhas tende a causar desligamentos de menor impacto, porém sua ocorrência deverá ser em um número mais elevado. Segundo estudos da área estima-se que cerca de 80% das falhas em sistemas de potência estão associadas a elementos pertencentes a sistemas de distribuição (Tsao et al., 2003). Devido a essa relevância da confiabilidade em sistemas de distribuição cada vez mais tem se aprimorado metodologias e critérios para definição de níveis de confiabilidade reais de um sistema.

Devido à relevância dos níveis de confiabilidade para as distribuidoras de energia elétrica, estas buscam constantemente meios de melhorar o desempenho em seus sistemas através de medidas operativas ou de manutenção e obras. Adotam a filosofia de ações corretivas concomitantemente com ações preventivas, ações que objetivam ou reduzir o número de interrupções no sistema ou abreviar o impacto que essas interrupções causam a empresa, ou seja, minimizam o número de consumidores interrompidos para cada evento. Essas ações variam de empresa para empresa de acordo com suas especificidades, porém em comum pode-se destacar como medidas operacionais as seguintes ações:

- Realocação de chaves de manobras para trechos de rede, o que permitirá interligações ótimas;
- Operação estratégica de equipamentos de manobra e proteção;
- Inspeção visual e através de termovisores das redes de distribuição;
- Reavaliação constante dos ajustes de proteção.

Já como medidas de manutenção e obras têm-se as seguintes ações:

- Ampliação do sistema de distribuição e das interligações entre sistemas de fontes diferentes, possibilitando a alternância de alimentação de trechos de rede de acordo com a necessidade;
- Ampliação do parque de equipamentos de proteção;
- Instalação de sistemas supervisores;
- Instalação de equipamentos telecomandados;
- Supressão de vegetal próximo a rede área de condutores sem cobertura (nus);
- Substituição de rede de condutores nus por condutores protegidos;

- Substituição e instalação de pára-raios.

2.3. Indicadores de Confiabilidade

Devido à importância que a confiabilidade representa para os sistemas de distribuição, buscam-se meios de mensurar e estabelecer indicadores comuns a continuidade do fornecimento de energia elétrica a cada consumidor ou um conjunto de consumidores de forma a quantificar o desempenho do sistema elétrico percebido por estes consumidores.

Há indicadores de continuidade amplamente utilizados em todo mundo e que possuem maneiras análogas de se apurar, onde se destacam os seguintes: SAIFI – *System average interruption frequency index*, SAIDI - *System average interruption duration index*. Esses indicadores quantificam a continuidade média e a duração média da interrupção do fornecimento de energia de um conjunto de clientes, mas também há indicadores que representam essa continuidade considerando os consumidores individualmente. Neste trabalho somente serão avaliados os indicadores relativos aos conjuntos de consumidores, já que a solução proposta influencia a performance operacional de um grande número de clientes e esses indicadores refletem a confiabilidade média do fornecimento de energia de um grupo de consumidores.

No Brasil atualmente está regulamentada a apuração desses indicadores mensalmente, trimestralmente e anualmente e estão baseados na quantidade de interrupções e duração destas para cada consumidor (DIC, FIC e DMIC) e para um conjunto de consumidores (DEC e FEC) atendidos pela distribuidora de energia.

Adicionalmente também é comum encontrar pesquisas que além dos indicadores de continuidade já citados apresentam a quantificação do valor de energia não fornecida como um custo a ser associado a sistemas de baixa confiabilidade, o denominado ENS – energia não suprida que corresponde à parcela de energia não entregue e por consequência não vendida pela empresa de energia. Desta maneira, com a utilização desse indicador é possível avaliar o impacto na performance financeira que baixos níveis de confiabilidade representam para a empresa de energia (Stojkov et al., 2004). A maior vantagem da utilização desse critério é a possibilidade de mensurar com elevado nível de objetividade seu impacto

na companhia de energia elétrica, pois pode ser avaliado em energia não faturada, ou seja, perdas financeiras diretas. Há também outro benefício em considerar o critério ENS, pois ele pode ser calculado com um alto grau de precisão, já que para o seu cálculo são necessários apenas dados de topologia, parâmetros das redes, taxa de falhas e perfil de utilização de energia de seus consumidores. Estes são dados que a maioria das companhias de distribuição de energia elétrica já dispõe.

2.4. Alocação de Chaves de Manobra

Na avaliação dos níveis de confiabilidade de sistemas de distribuição devem ser consideradas ações de planejamento e de operação, mesmo que as novas tecnologias implementadas aumentem o nível de confiabilidade destes sistemas. Dentre as possíveis ações já citadas, o objetivo deste trabalho é concentrar esforços em avaliar o impacto técnico na redução dos índices de confiabilidade com a alocação de chaves de operação sob carga telecomandada nas redes de distribuição de um dado sistema. Considera-se a possibilidade de instalação de chaves NA e NF.

Para realizar a alocação ótima destes equipamentos de manobra deve-se analisar que problemas como estes são na verdade problemas combinatórios com possibilidades quase ilimitadas. Neste caso, a verificação de todas as barras possíveis para instalação destes equipamentos tornará o processamento das informações demasiadamente demorado, assim métodos conhecidos de programação linear ou não linear não poderão ser utilizados na sua resolução. Por isso a literatura apresenta como alternativa a utilização de métodos mais informais como algoritmos genéticos, *simulated annealing*, redes neurais, tabu search e entre outras, que possibilitam buscar soluções ótimas ou quase ótimas utilizando recursos de processamento de informações mais razoáveis (Comassetto, 2004).

Em síntese, o que se busca nesse processo de alocação de chaves de manobra é utilizar um histórico de interrupções para propor alternativas de reconfigurações e isolamentos de sistemas objetivando o restabelecimento de energia para a maior quantidade de consumidores possível. O desafio é a escolha

dos critérios que serão aplicados nesse processo e sua priorização, baseado em sistemas de tomada de decisão multicritério, apresentando como restrição do conjunto de soluções possíveis o carregamento dos sistemas envolvidos e o nível de tensão dos clientes alimentados. Desta forma, o objetivo é desenvolver uma metodologia que priorize os pontos possíveis de instalação desses equipamentos de acordo com objetivos e critérios, considerando seus níveis de importância (Sperandio, 2008).

2.5. Análise Multicriterial

Há várias metodologias para realizar a análise multicriterial para a solução do problema apresentado de alocação de chaves de manobra em redes de distribuição para otimizar os níveis de confiabilidade desses sistemas. Para cada metodologia há sempre associadas funções objetivos e áreas de restrições que são consideradas quando se efetua a otimização dos sistemas. Tais considerações são pertinentes, pois sempre que houver mais de um ponto técnico de escolha para a instalação da chave de manobra, faz-se necessário adotar algoritmos para realizar a priorização destes pontos.

O problema de alocação ótima de chaves de manobras em sistemas de distribuição já tem sido estudado por diversos autores, neste aspecto alguns estudos em particular foram considerados tais como (Celli et al., 1999), (Carvalho et al., 2005), (Villasanti et al., 2008), (da Silva et al., 2004), (De Tuglie et al., 2004), (Wenyu et al., 2004) e entre outros.

A abordagem desses problemas pode ser realizada de diversas maneiras, sendo que a maioria dos trabalhos considera a priori um conjunto de restrições e critérios para reduzir a área de busca e em seguida utilizam métodos de otimização para escolher a melhor solução para o problema. Dentre as técnicas possíveis destacam-se algoritmos genéticos, *Branch-and-Bound*, Busca Tabu, técnicas heurísticas, entre outras.

Na busca de pontos para a instalação de equipamentos de manobra normalmente adota-se como restrição as conseqüências que a reconfiguração e isolamento de trechos proporcionarão, tais como nível de tensão e carregamento de

elementos oriundos na nova configuração elétrica. Apesar das restrições reduzirem as soluções possíveis é necessário promover a hierarquização destas soluções possíveis através de um método de apoio à decisão multicriterial. Uma vez que inevitavelmente a instalação de um equipamento de manobra deverá contemplar critérios como redução dos indicadores de continuidade, redução da ENS, entre outros, que representem as necessidades e objetivos estratégicos de cada companhia de distribuição de energia elétrica, ainda considerando o menor investimento necessário. Problemas como estes são comuns em escolhas a serem realizadas e podem ser denominados como problemas de otimização ou de tomada de decisão multicriterial

Métodos de otimização multicriterial são aplicados constantemente na análise para auxiliar o planejamento e operação de sistemas de potências e em especial em sistemas de distribuição (Ekel et al., 1999), sendo que trabalhos como (Ekel et al., 1999), (Moldrik et al., 2009), (Bernardon et al., 2009) e (de Almeida et al., 2008) exemplificam com precisão as amplas áreas de conhecimento e metodologias possíveis na abordagem multicriterial.

Nesta dissertação objetiva-se a utilização de técnicas e análise multicriterial para identificação da melhor localização de equipamentos de manobra em redes de distribuição. Para tal análise utiliza-se a metodologia AHP - *Analytic Hierarchy Process* (Saaty, 1980), que apresenta a possibilidade de ponderar os diversos critérios avaliados utilizando como parâmetro a opinião dos especialistas e técnicos da empresa. Com essa metodologia é possível estabelecer os locais ótimos para instalação de equipamentos de manobra de modo a considerar os critérios mais adequados para a empresa de energia utilizando a experiência dos especialistas da empresa na ponderação desses critérios.

Dentre as diversas metodologias multicriteriais adotadas em problemas de tomadas de decisão em sistemas de distribuição, trabalhos utilizando metodologias como fuzzy (Bernardon et al., 2009) e principalmente com a utilização de Bellman-Zadeh (Canha, 2004) tem sido amplamente utilizados e apresentando bons resultados. Esses métodos utilizam a opinião de especialistas, porém tratam apenas da consolidação da opinião desses especialistas sem avaliar se a opinião destes apresenta coerência e consistência em relação ao problema apresentado. A grande contribuição desse trabalho consiste na escolha e utilização da metodologia AHP como metodologia que permite avaliar a consistência das informações dos

especialistas e não apenas consolidá-la como os métodos anteriores, possibilitando assim descartar a opinião de especialistas que apresentem muita incoerência em suas avaliações tornando a resposta final ao problema muito mais exata quando comparado aos métodos anteriores. Tal contribuição é essencial na solução de problemas desse tipo, pois a escolha de especialistas não adequados para o problema avaliado produzirão resultados finais muito distantes do proposto, sendo que os trabalhos desenvolvidos desconsideram essa possibilidade de inconsistência considerando tanto mais especialistas quantos forem possíveis utilizar.

2.6. Metodologia Proposta pelo Autor

O objetivo desse trabalho é estabelecer uma metodologia para identificar os melhores locais em um sistema de distribuição para a instalação de equipamentos de manobra telecomandados. Para tanto deverá ser verificada a viabilidade e necessidade da instalação desses equipamentos, apresentando como restrição os níveis de carregamento e níveis de tensão possíveis e como função objetivo o valor ótimo da combinação dos critérios de redução de DEC, FEC e ENS.

Para o cálculo de fluxo de potência que definirá as restrições para o conjunto de soluções, é utilizado o algoritmo convencional de fluxo de potencia para redes de distribuição radiais denominado de somatório de correntes. Este procedimento consiste no emprego de um método não matricial que devido ao grande número de barras dos sistemas de distribuição tende a reduzir o tempo de processamento e permite o cálculo de fluxo de potencia para diversas condições de configuração possíveis (Bernardon, 2007).

Para avaliar o impacto de redução nos critérios DEC, FEC e ENS previamente escolhidos, decorrentes da instalação dos equipamentos de manobra é necessário optar por uma metodologia que represente o desempenho e confiabilidade das redes de distribuição em avaliação. Para tanto nesse trabalho é utilizado o modelo analítico para avaliação dos indicadores integrais de confiabilidade, chamado de MLE – Matriz Lógico Estrutural (Abaide, 2005) que com base na topologia da rede de distribuição em avaliação, disposição de seus consumidores e os tempos médios

de restabelecimento de energia permite calcular os valores de DEC, FEC, ENS entre outros.

Com a definição das restrições existentes e os critérios de avaliação mensurados é necessário utilizar uma metodologia de análise para definir entre as soluções possíveis qual a que melhor contempla a avaliação dos especialistas, para tanto é utilizado a metodologia AHP para a tomada de decisão multicriterial e estimativa de especialista da empresa que permitirá hierarquizar as soluções possíveis de acordo com suas prioridades.

Adicionalmente é necessário esclarecer que essa revisão bibliográfica tem como objetivo apresentar a possibilidade de soluções do problema de alocação de equipamentos de manobra telecomandados utilizando algoritmos de apoio à tomada de decisão multicritério. Estes problemas representam um assunto de grande importância para as empresas de distribuição de energia, pois permitem várias soluções. Assim, uma metodologia que aponte a melhor localização desses equipamentos de manobra telecomandados representa um benefício de grande importância para empresa de distribuição de energia.

3. MODELAGEM E FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROBLEMA

Neste capítulo é definida a modelagem mais adequada das redes de distribuição que serão analisadas, a descrição dos equipamentos de manobra que serão avaliadas, o algoritmo de fluxo de potencia para redes de distribuição avaliadas e por fim o calculo dos principais critérios que serão considerados nesse trabalho.

Para representação da topologia de rede de sistemas de distribuição é utilizado como referência o Anexo A, que apresenta toda a metodologia apropriada para sistemas com essas características.

3.1. Fluxo de Potência em Sistemas de Distribuição

Determinar o fluxo de potência em sistemas de distribuição de energia elétrica é essencial em diversas áreas de uma concessionária de energia sendo primordial na operação, no planejamento, manutenção, projetos e entre outras, sempre que houver a necessidade de realizar avaliações sob as condições atuais e futuras dos sistemas e redes sob sua responsabilidade. Porém um grande problema enfrentado por essas empresas é que normalmente só há supervisão e monitoramento até as fontes de seus sistemas de média tensão, ou seja, até suas subestações. Para tanto a determinação das condições de operação do restante do sistema de distribuição só foi possível através de ferramentas de estimação de estados para os demais pontos a jusantes das SE's. Desta forma, para atingir tal objetivo são utilizados metodologia de cálculo de fluxo de potência a partir de dados da topologia de rede e dos valores reais de monitoramento e supervisão obtidos a partir da subestação.

Nesse trabalho a importância do fluxo de potência deve-se ao fato que na análise da alocação dos equipamentos telecomandados, é necessário verificar a viabilidade da utilização destes, ou seja, é importante analisar se as manobras desejadas serão realmente exequíveis e para tanto é necessário estimar o novo

estado de operação das redes de distribuição através do cálculo de fluxo de potência.

Para tal nesse trabalho é utilizado o algoritmo chamado de somatório de correntes (Bernardon, 2004), que é uma metodologia baseada na representação de topologia apresentada anteriormente, normalmente denominada de metodologia de “alfa” e “beta” para a realização do fluxo de potência e a análise dos carregamentos e níveis de tensão desse sistema. Tal metodologia é adequada para sistemas de distribuição, pois é direcionada para avaliação de redes radiais, ou seja, redes tipicamente de distribuição de energia.

Inicialmente é necessário definir como serão representadas as cargas elétricas do sistema analisado. Nesse trabalho as cargas são em geral os valores de potência ativa e reativa dos transformadores de distribuição. Tal potência que será absorvida por um transformador de distribuição depende do tipo de carga a ele conectado e da tensão aplicada sobre esta. Neste trabalho tem-se como premissa que o comportamento das cargas possui potências constantes independente do comportamento da tensão, com valores de correntes regidos conforme:

$$I = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{3} \cdot V} \quad (3.1)$$

onde:

- I = corrente absorvida pela carga (A);
- V = tensão aplicada à carga (kV);
- P = potência ativa absorvida pela carga (kW);
- Q = potência reativa absorvida pela carga (kVAr).

Desta forma, a corrente absorvida pela carga é inversamente proporcional à tensão de alimentação desta. Tal comportamento de carga promove uma solução de fluxo de potência inexata e não constante, já que a carga se comportará em função da tensão e esse valor de tensão em princípio não é conhecido em cada uma das barras. Conforme modificam os valores de carga, modificam-se os valores de queda de tensão e assim os valores de tensão em cada barra, o que por sua vez altera os valores de carga de cada barra e assim segue-se sucessivamente. Ou seja, tal solução só é possível utilizando-se de um algoritmo iterativo que é apresentado a seguir.

Primeiramente para realizar o cálculo do fluxo de potência através do algoritmo proposto devem-se adicionar no conjunto dos nós utilizado para representar a topologia de rede mais uma coluna contendo a corrente de contribuição de cada um dos nós avaliados.

Considerando que os valores de corrente de cada nó dependem do valor de tensão, inicialmente adota-se que todos os nós estão submetidos à mesma tensão da subestação, ou seja, nesse momento inicial as quedas de tensão de cada trecho são desconsideradas. Assim, calculam-se as parcelas ativa e reativa dos valores de corrente de cada um dos elementos, ou seja, as contribuições dos transformadores de distribuição, banco de capacitores, fontes de geração e entre outros.

Desta forma avaliando a mesma topologia anteriormente disposta, o conjunto dos nós permanece:

Nó	Característica α_n	Característica β_n	Corrente
1	1	1	I1
3	2	3	I3
2	3	2	I2

Quadro 3.1 - Conjunto de nós considerando o valor de contribuição de corrente de cada nó.

Para determinar o valor de corrente nos ramos primeiramente deve-se realizar um processamento dos valores de corrente no conjunto dos nós, adicionando uma coluna na tabela do conjunto dos ramos com os valores de corrente nestas através da característica β_n , conforme segue:

Nó inicial	Nó Final	Característica α_r	Característica β_r	Corrente
0	1	1	-	I1
1	2	2	1	I2
1	3	3	1	I3

Quadro 3.2 – Conjunto de ramos acrescido dos valores iniciais de corrente de cada ramo através característica β_n .

Posteriormente para se obter o valor final de cada ramo é necessário realizar o somatório da corrente de todos nós partindo sempre em direção inversa ao fluxo

de potência, ou seja, da carga até a subestação de acordo com os valores da característica β_r :

Nó inicial	Nó Final	Característica α_r	Característica β_r	Corrente
0	1	1	-	$I_1 + I_2 + I_3$
1	2	2	1	I_2
1	3	3	1	I_3

Quadro 3.3 – Conjunto de ramos acrescido dos valores iniciais de corrente de cada ramo através característica β_n .

Desta forma, o fluxo de potência obtido nos ramos é o mesmo conforme demonstrada a seguir:

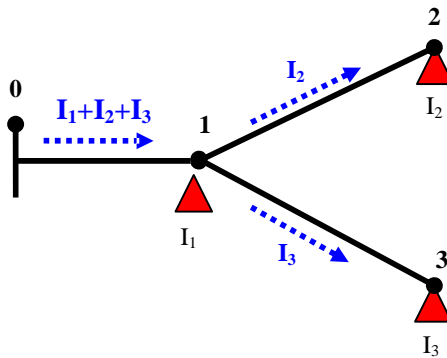


Figura 3.1: Representação do fluxo de carga da topologia considerada.

Posteriormente, de posse dos valores de corrente de cada ramo da topologia, é possível calcular as quedas de tensão que cada trecho de condutores proporciona. Determinado as quedas de tensão dos ramos, é possível a partir do valor de tensão conhecido da barra da subestação, determinar os valores de tensão em cada nó subtraindo esse valor aos valores de queda de tensão acumulados em cada um dos ramos. Com novos valores de tensão é possível realizar uma nova iteração de cálculo para determinar novos valores de correntes de todos os nós, quedas de tensão de todos os ramos e assim sucessivamente.

Desta forma, a cada iteração os valores de corrente e tensão de todos os nós se modificam, assim para determinar um valor de fluxo de potência adequado, ou seja, um conjunto de valores convergentes é necessário verificar a diferença entre o

novo valor de tensão calculado para todos os nós com o valor de tensão calculado na iteração anterior. Sendo essa diferença inferior a um valor pequeno e pré-definido conclui-se que a solução apresentada pelo cálculo do fluxo de potência dessa topologia é convergente determinando o fim da necessidade de novas iterações. Neste trabalho considera-se como erro máximo aceitável entre uma iteração e outra o valor de 0,5%.

Na avaliação de topologias de redes de distribuição de energia elétrica é importante destacar que existirão elementos adicionais aos apresentados até o momento no conjunto de nós e ramos. No conjunto dos ramos além dos trechos de rede, com seu respectivo condutor, deverão conter elementos como equipamentos de manobra, equipamentos de proteção, reguladores de tensão, transformadores elevadores, transformadores rebaixadores, autotransformadores com tap fixo e entre outros. Já no conjunto dos nós além dos transformadores de distribuição, com seus valores de carga, deverão ser acrescentados elementos que são conectados a um único nó como banco de capacitores, fontes de geração, entre outros.

A seguir é demonstrado a construção de conjuntos de nós e ramos de uma topologia de rede de distribuição mais completa contendo os elementos citados anteriormente conforme a Figura 3.2.

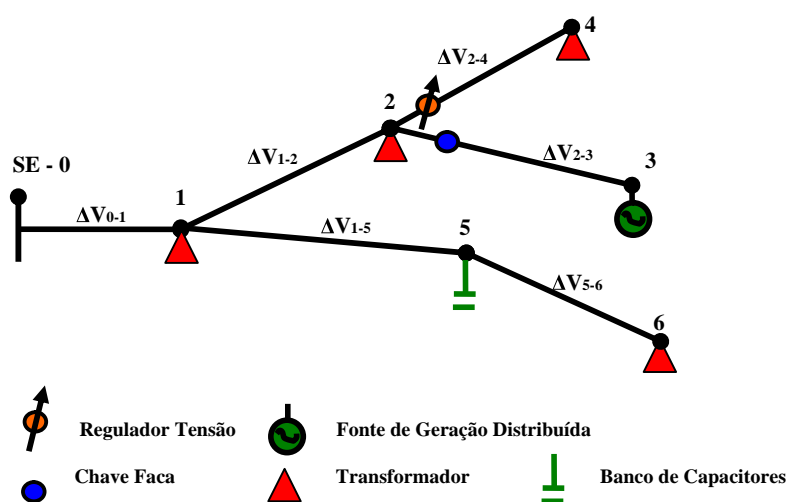


Figura 3.2: Topologia de uma rede de distribuição de energia elétrica real.

Nesta topologia de rede de distribuição verificam-se novos elementos no conjunto de nós e ramos, destacando-se os elementos consumidores de carga, os de geração de potência, os de correção de níveis de tensão e de reativos e os de

manobra do sistema, sendo que os elementos de manobra para cálculo de fluxo de potência não são relevantes, mas que necessitam serem representados para análises futuras.

Para a topologia de rede distribuição o conjunto dos nós e ramos permanecem da seguinte forma:

Nó	α_n	β_n	Elemento	Demanda Ativa (kW)	Demanda Reativa (kVAr)	Número de Consumidores
1	1	1	Transformador	P1	Q1	N1
2	2	2	Transformador	P2	Q2	N2
3	3	3	Geração	-P3	$\pm Q3$	-
4	4	4	Transformador	P4	Q4	N4
6	5	6	Transformador	P6	Q6	N6
5	6	5	Banco Capacitor	-	-Q5	-

Quadro 3.4 – Conjunto de nós para a topologia de rede proposta.

Nó Inicial	Nó Final	α_r	β_r	Elemento	Capacidade Nominal	Estado / Extensão	Resistência (Ω/km)	Reatância (Ω/km)
1	1	1	-	Condutor	A	L0-1	r0-1	x0-1
2	2	2	1	Condutor	A	L1-2	r1-2	x1-2
3	3	3	2	ChaveFaca	A	N.F.	-	-
4	4	4	2	Regulador	kVA	%regulação	-	-
6	5	5	1	Condutor	A	L1-5	r1-5	x1-5
5	6	6	5	Condutor	A	L5-6	r5-6	x5-6

Quadro 3.5 – Conjunto de ramos para a topologia de rede proposta.

Adicionalmente no cálculo do fluxo de potência inserem-se no conjunto dos ramos os valores de queda de tensão, tensão do nó inicial e tensão do nó final conforme:

Nó Inicial	Nó Final	α_r	β_r	Elemento	Queda de tensão (kV)	Tensão Nó Inicial (kV)	Tensão Nó Final (kV)
1	1	1	-	Condutor	ΔV_{0-1}	V0	$V1 = V0 - \Delta V_{0-1}$
2	2	2	1	Condutor	ΔV_{1-2}	V1	$V2 = V1 - \Delta V_{1-2}$
3	3	3	2	ChaveFaca	ΔV_{2-3}	V2	$V3 = V2$
4	4	4	2	Regulador	ΔV_{2-4}	V2	$V4 = V2 \pm V_{REG}$
6	5	5	1	Condutor	ΔV_{1-5}	V1	$V5 = V1 - \Delta V_{0-1}$
5	6	6	5	Condutor	ΔV_{5-6}	V5	$V6 = V5 - \Delta V_{0-1}$

Quadro 3.6 – Acréscimo no conjunto dos ramos os valores de tensão.

Para a utilização do cálculo de fluxo de potência no auxílio a tomada de decisão de problemas como o de alocação de equipamentos de manobra deverão ser considerados os valores máximos de demanda dos transformadores de distribuição, pois tais equipamentos deverão estar aptos a operarem sob as condições mais adversas do sistema em que atuam. Portanto sempre que calculado o fluxo de potência, este deverá ser corrigido proporcionalmente aos valores de demanda máximos verificados e medidos na fonte que o alimenta.

3.2. Cálculo de Indicadores de Continuidade

A avaliação de confiabilidade de sistemas de distribuição de energia elétrica só pode ser avaliada quando mensurada, neste aspecto a quantificação de indicadores de continuidade do fornecimento são essenciais, por esse motivo neste trabalho são avaliados o valor de ENS, DEC e FEC ocasionados por interrupções nos sistemas de distribuição, pois é necessário ter conhecimento dos benefícios que a alocação de equipamentos de manobra telecomandados proporcionará ao sistema.

A formulação matemática para realizar a correta apuração desses indicadores de continuidade muitas vezes pode ser muito complexa já que não há homogeneidade na disposição dos equipamentos de proteção e manobra. Desta forma, para simplificar essa apuração a utilização da MLE - matriz lógica estrutural proposta (Abaide, 2005) representa uma solução adequada para sistemas de

distribuição, pois sua complexidade depende mais da disposição dos equipamentos e esquemas de proteção do que das características das interrupções.

3.2.1. MLE – Matriz Lógico Estrutural

Neste trabalho para realizar a avaliação dos indicadores de continuidade de redes de distribuição é utilizada a metodologia MLE, pois será necessário calcular esses indicadores com a rede de distribuição operando em seu estado normal e posteriormente calcular esses mesmo indicadores considerando a instalação dos equipamentos de manobra telecomandados. Para utilização da metodologia MLE é necessário considerar os seguintes parâmetros:

- tamanho de cada trecho de rede = ℓ ;
- taxa de falhas por unidade = λ_o ;
- tempo de restabelecimento do fornecimento de energia = τ ;
- Número de consumidores = N.
- Carga dos transformadores de distribuição = S.

Destacando-se que em geral a parcela é composta por três outras parcelas conforme:

- τ_{desp} : tempo de Despacho ou ainda Tempo de Espera;
- τ_{desl} : tempo de Deslocamento (da equipe até o local);
- τ_{man} : tempo de Manutenção ou Tempo de Execução do Serviço.

Com tais parâmetros é possível determinar os valores esperados de DEC, ENS e FEC de um alimentador para o período de um ano.

Na implementação da MLE cada coluna desta matriz equivale a cada um dos trechos da rede de distribuição, já cada linha equivale um equipamento conectado a algum nó da topologia em análise. Em cada célula dessa matriz colocam-se os valores médios de tempo de restabelecimento de energia. Porém para determinar

esse valor é necessário avaliar quanto tempo é necessário para o restabelecimento do fornecimento de energia para os consumidores ligados ao transformador de distribuição (linha da matriz), no caso de falta no trecho da rede de distribuição (coluna da matriz), considerando os equipamentos de comutação instalados na rede. Destacando que na avaliação dos indicadores DEC e ENS essas células deverão ser preenchidas com as parcelas de tempo, porém na avaliação do FEC esses valores serão iguais a um ou a zero.

Os preenchimentos dessas células dependem do tipo de equipamento instalado, sendo que a MLE permite considerar a presença de qualquer tipo de equipamento de comutação, sendo estes apenas de manobra ou proteção.

Para exemplo de formatação da MLE e cálculo dos indicadores de continuidade abordados nesse trabalho, será utilizado como referencia a topologia da rede de distribuição disposta abaixo.

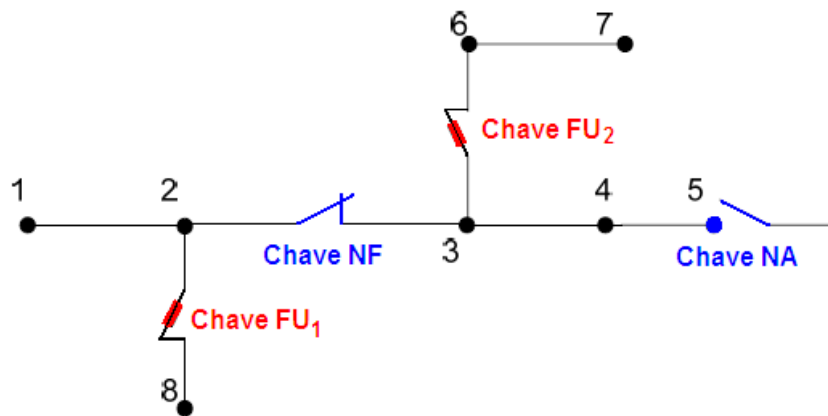


Figura 3.3: Exemplo de uma Topologia real para formatação da MLE.

A topologia acima representa um sistema simplificado de uma rede de distribuição real destacando em azul os equipamentos de manobra e em vermelho os equipamentos de proteção, tal diferenciação é necessária, pois na montagem da MLE será importante o conhecimento do tipo de equipamento de comutação existente para determinar o correto preenchimento das células da matriz.

3.2.2. Cálculo do Indicador DEC

Para obtenção dos valores de DEC e ENS inicialmente é necessário realizar a formatação da MLE conforme topologia apresentada anteriormente.

Em princípio para cada defeito ocorrido na rede de distribuição para cada um dos nós teríamos um tempo de reparo (t_r) necessário para adequar seu fornecimento novamente. Porém dependendo do tipo de equipamento a montante do defeito o preenchimento da célula da matriz poderá se modificar, pois o tempo de reparo para restabelecer o fornecimento de uma barra poderá ser substituído por tempo de atuação de um equipamento de proteção ou pelo tempo de manobra de uma chave de comutação.

Para topologia apresentada é necessário uma avaliação de atuação dos equipamentos, principalmente as chaves de manobra e chaves fusíveis, conforme:

- Chaves de Manobra: Operacionalmente só existem duas ações possíveis com esse tipo de equipamento dependendo da localização do defeito. Para defeitos a jusantes de chaves NF será possível promover o isolamento do trecho defeituoso em relação à rede de distribuição a montante desse equipamento, ou seja o tempo de reparo para esses trecho a montantes do equipamento pode ser substituído pelo tempo de isolamento (t_i) do defeito. Já para defeitos a montante de uma chave NF que possuam um par de chaves NA a jusante desse e que interligue com outra fonte de suprimento, é possível promover a transferência dos clientes a jusantes da chave NF para essa nova fonte de alimentação, substituindo o tempo de reparo desses clientes pelo tempo de transferência (t_t).
- Chaves de proteção (Fusíveis): Esses equipamentos têm o objetivo de não permitir que defeitos a jusantes atinjam nós a montantes. Assim para defeito a jusantes desse trecho o tempo reparo dos nós a montantes será igual a zero, já para os nós a jusantes o tempo de reparo permanece.

Finalizada a avaliação dos tipos de equipamentos existentes e o tipo de atuação é possível determinar a MLE conforme:

	Trechos/Nós com defeito							
Nó Inicial	1	2	3	4	5	6	7	8
1	tr1	tr2	ti	ti	ti	0	0	0
2	tr1	tr2	ti	ti	ti	0	0	0
3	tt	tt	tr3	tr4	tr5	0	0	0
4	tt	tt	tr3	tr4	tr5	0	0	0
5	tt	tt	tr3	tr4	tr5	0	0	0
6	tt	tt	tr3	tr4	tr5	tr6	tr7	0
7	tt	tt	tr3	tr4	tr5	tr6	tr7	0
8	tr1	tr2	ti	ti	ti	0	0	tr8

Quadro 3.7 – MLE considerando o tipo de equipamento e atuação das chaves de manobra e chaves de proteção.

Como os tempos tr, tt e ti são tempos médios, para realizar uma integralização dos indicadores de continuidade é necessário considerar a probabilidade dos defeitos ocorrerem, para tal é possível incluir na MLE a taxa de falhas de cada trecho e assim obtermos uma nova MLE conforme:

	Trechos/Nós com defeito							
Nó Inicial	1	2	3	4	5	6	7	8
1	tr1.λ1	tr2.λ21	ti.λ3	ti.λ4	ti.λ5	0	0	0
2	tr1.λ1	tr2.λ2	ti.λ3	ti.λ4	ti.λ5	0	0	0
3	tt.λ1	tt.λ2	tr3.λ3	tr4.λ4	tr5.λ5	0	0	0
4	tt.λ1	tt.λ2	tr3.λ3	tr4.λ4	tr5.λ5	0	0	0
5	tt.λ1	tt.λ2	tr3.λ3	tr4.λ4	tr5.λ5	0	0	0
6	tt.λ1	tt.λ2	tr3.λ3	tr4.λ4	tr5.λ5	tr6.λ6	tr7.λ7	0
7	tt.λ1	tt.λ2	tr3.λ3	tr4.λ4	tr5.λ5	tr6.λ6	tr7.λ7	0
8	tr1.λ1	tr2.λ2	ti.λ3	ti.λ4	ti.λ5	0	0	tr8.λ8

Quadro 3.8 – MLE integralizada com os tempos e a taxa de falhas de cada trecho.

Determinado a MLE final, é possível determinar o valor do indicador de duração de interrupção individual de cada nó ou consumidor – DIC, bastando

apenas realizar a soma da linha do respectivo nó em avaliação. Para exemplo, o DIC do nó 8 é conforme:

$$DIC_8 = \sum_j^n M_{8,j} = tr_1.\lambda_1 + tr_2.\lambda_2 + ti.\lambda_3 + ti.\lambda_4 + ti.\lambda_5 + 0 + 0 + tr_8.\lambda_8 \quad (3.2)$$

Desta forma, para estimar o valor de DEC da topologia de rede toda, é necessário calcular o DIC de cada linha e multiplicar pelo seu respectivo número de consumidores, soma-se os valores de todas as linhas e por fim dividi-se o total pelo número de consumidores base, que normalmente é o número total de consumidores avaliados. Conforme demonstra a equação a seguir.

$$DEC = \frac{\sum_i^n \left(\sum_j^n M_{i,j} \right) \cdot N_i}{N_c} \quad (3.3)$$

Onde:

- *DEC* - Duração de interrupção equivalente por consumidor;
- *M_{i,j}* - Elemento da linha i e coluna j da MLE;
- *N_i* - Número de consumidores da linha i;
- *N_c* - Número de consumidores base.

É importante destacar que o valor de *N_c*, que representa a base de comparação, podendo ser somente a quantidade de clientes totais da topologia em análise ou até a quantidade total de consumidores da companhia de energia elétrica, com o intuito de demonstrar o impacto total do investimento na redução nos seus indicadores de continuidade globais.

3.2.3. Cálculo do Indicador ENS

Para mensurar o valor de energia não distribuída é utilizada a mesma avaliação realizada na quantificação do DIC/DEC, porém ao invés de multiplicar cada linha por seu número de consumidores, faz-se o mesmo utilizando a carga de cada linha, conforme demonstra a equação.

$$ENS = \sum_i^n \left(\sum_j^n Mi, j \right) \cdot Si \quad (3.4)$$

Onde:

- *ENS* - Energia Não Suprida;
- *Mi, j* - Elemento da linha i e coluna j da MLE;
- *Si* - Carga da linha i.

3.2.4. Cálculo do Indicador FEC

Para obtenção do indicador FEC é realizado o mesmo procedimento de cálculo utilizado para obtenção do indicador DEC, porém utilizando-se uma MLE intermediária, pois o indicador FEC representa a frequência equivalente de interrupções, ou seja, para esse indicador não é importante a duração das interrupções e somente a quantidade destas. Assim essa nova MLE será a mesma apresentada anteriormente com os tempos *tr*, *tt* e *ti* eliminados da matriz, permanecendo a MLE conforme abaixo.

	Trechos/Nós com defeito							
Nó Inicial	1	2	3	4	5	6	7	8
1	λ1	λ2	λ3	λ4	λ5	0	0	0
2	λ1	λ2	λ3	λ4	λ5	0	0	0
3	λ1	λ2	λ3	λ4	λ5	0	0	0
4	λ1	λ2	λ3	λ4	λ5	0	0	0
5	λ1	λ2	λ3	λ4	λ5	0	0	0
6	λ1	λ2	λ3	λ4	λ5	λ6	λ7	0
7	λ1	λ2	λ3	λ4	λ5	λ6	λ7	0
8	λ1	λ2	λ3	λ4	λ5	0	0	λ8

Quadro 3.9 – MLE considerando apenas a taxa de falhas de cada trecho para o cálculo do FEC.

Da mesma maneira que no cálculo do DEC, porém utilizando agora a MLE modificada, para o cálculo do FEC é necessário realizar a multiplicação do somatório de cada linha pelo seu respectivo número de consumidores e então o resultado de todas as linhas são somados e posteriormente divididos pelo número base de consumidores.

$$FEC = \frac{\sum_i^n \left(\sum_j^n M_{mi,j} \right) \cdot N_i}{N_c} \quad (3.5)$$

Onde:

- FEC - Frequência de interrupção equivalente por consumidor;
- $M_{mi,j}$ - Elemento da linha i e coluna j da MLE Modificada para cálculo de FEC;
- N_i - Número de consumidores da linha i ;
- N_c - Número de consumidores base. $M_{i,j}$ = Elemento da linha i e coluna j da MLE;

3.3. Equipamentos de Manobra e Proteção

Os dispositivos de manobra e proteção utilizados em sistemas de distribuição não têm sofrido mudanças significativas nos últimos anos em sua filosofia de atuação e são em geral sempre os mesmos utilizados: chaves fusíveis, chaves repetidoras, religadores, chaves faca e chaves sob-carga.

Nos itens a seguir serão descritos brevemente esses dispositivos de manobra e de proteção.

3.3.1. Chaves Fusíveis

Uma chave fusível é um dispositivo de proteção que tem seu funcionamento baseado no princípio que quando o valor de corrente ultrapassa a intensidade

máxima do elo fusível, é gerado um calor tão intenso que promove o derretimento do elemento fusível. Desta forma, a chave fusível abrirá e assim interromperá o circuito a jusante que dado ao valor de corrente elétrica possivelmente estará submetido a um curto-circuito.

Uma vez o elo fusível atuado, só é possível o restabelecimento de energia dos clientes a jusantes deste com o deslocamento da equipe até esse equipamento e substituição desse elo, logicamente após inspeção e reparo do possível defeito.



Figura 3.4: Exemplo de uma chave fusível.

3.3.2. Chaves Repetidoras

Chaves repetidoras possuem um funcionamento baseado no mesmo princípio que as chaves fusíveis, pois de maneira simplificada podem ser consideradas como um dispositivo que opera como chave fusível possuidor de mais duas chaves fusíveis reservas.

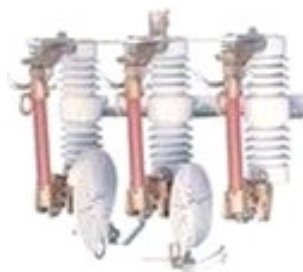


Figura 3.5: Exemplo de uma chave repetidora.

3.3.3. Religadores

Religadores são dispositivos de proteção com programação flexível permitindo a interrupção automática com abertura e fechamento instantâneos e temporizados de acordo com o surgimento de defeitos transitórios e assim como a abertura permanente sob defeitos permanentes, de acordo com a programação imposta ao equipamento.

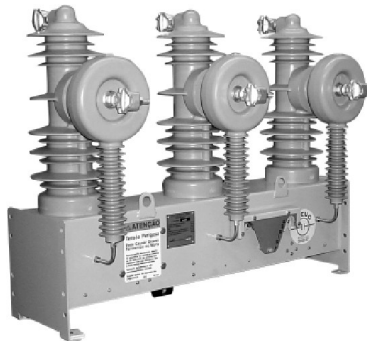


Figura 3.6: Exemplo de um religador digital.

3.3.4. Chaves Faca

Chaves faca são dispositivos com a função básica de seccionar ou interligar redes de distribuição, ou seja, é utilizada apenas para abertura ou fechamento manual de trechos de rede. Apresentando como desvantagem a possibilidade de operar quando submetida somente a valores reduzidos de corrente elétrica, limitado pela produção de arco voltaico durante a operação, excetuando-se os casos em que operar com o auxílio de um equipamento denominado *load buster* que permitirá sua operação com níveis de correntes mais altos, porém é importante destacar que tal operação não é compatível com todas as chaves facas existente e que exige a intervenção de um eletricista para sua operação.

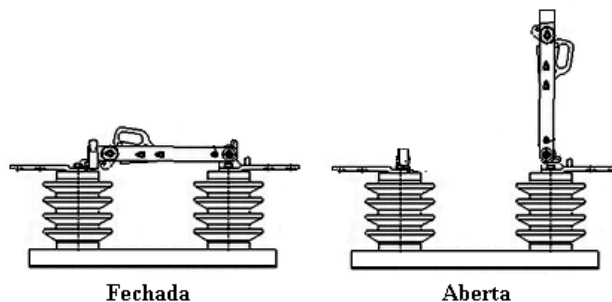


Figura 3.7: Exemplo de uma chave faca.

3.3.5. Chaves com Abertura Sob Carga

As chaves com abertura sob carga ou habitualmente denominadas de chaves sob carga apresentam a mesma funcionalidade das chaves faca, porém possuem uma capacidade elevada de operação quando submetida à passagem de corrente elétrica. Isso só é possível, pois possuem um meio de extinção do arco voltaico que podem ser gás SF₆, óleo isolante ou vácuo, por esse motivo que as chaves sob carga são comumente denominadas de chaves SF₆, chaves a óleo, chaves a vácuo, respectivamente.



Figura 3.8: Exemplo de uma chave sob carga.

3.3.6. Equipamentos de Manobra Telecomandados

Equipamentos de manobra telecomandados são equipamentos que possuem sua supervisão, operação e controle a distância, através de meio de comunicação que interliguem diretamente esse equipamento ao centro de operação da companhia de energia.

Atualmente diversas companhias de distribuição de energia elétrica têm optado por telecomandar dispositivos de manobra com o intuito de obter um melhor desempenho operacional em seus sistemas. Tais equipamentos representam atualmente um grande diferencial para empresas, pois apresentam as seguintes características:

- Identificação em tempo real dos defeitos ocorridos a jusantes desses;
- Caracterização do tipo de defeito ocorrido, fases atuadas, intensidade e entre outros;
- Possibilidade de supervisão dos valores de corrente e tensão elétrica;
- Abertura e fechamento automático do dispositivo e sem a necessidade de deslocamento de recursos humanos para sua operação;
- Redução nos indicadores de continuidade;
- Redução da necessidade de disponibilidade de equipes de manutenção.

Neste trabalho é utilizada a chave de manobra sob carga telecomandada como referência para automatização das redes de distribuição de energia, conforme demonstra a Figura 3.9. Porém, é importante destacar que se podem telecomandar outros tipos de equipamentos, sendo comum além das chaves de manobra, a realização de telecomando em religadores.



Figura 3.9: Exemplo de uma chave telecomandada.

4. ANÁLISE MULTICRITERIAL: *ANALYTIC HIERARCHY PROCESS (AHP)*

Nesse capítulo é apresentada a metodologia de análise multicriterial proposta pelo trabalho como algoritmo adequado para solução de problemas em sistemas de distribuição de energia elétrica em função das características do método e possibilidade de variações deste método proposta neste trabalho.

Especificamente para o problema de alocação de equipamentos de manobra telecomandados a adoção de um algoritmo que auxilie na tomada de decisão de escolha do local de instalação desse dispositivo é imprescindível, já que em princípio haverá muitas possibilidades de instalação desses equipamentos, porém em um universo de recursos financeiros disponíveis muito limitados. Para priorizar quais locais para instalação desses equipamentos são mais importantes e que deverão ser priorizados para receberem postos de chaves telecomandadas, deve-se mensurar o ganho que tal equipamento representará considerando diversos critérios.

O desafio nesse tipo de problema é definir qual solução é mais harmônica dentre as funções objetivo consideradas, pois uma solução pode ser excelente em um critério e precária em outro e assim sucessivamente. Portanto, para esse tipo de problema é necessário a aplicação de uma metodologia de análise e decisão multicriterial para determinar uma solução ótima e a priorização das soluções possíveis.

Atualmente existem diversos métodos matemáticos disponíveis para auxiliar na tomada de decisão multicriterial, que proporcionarão resultados diversos dependendo da forma como forem utilizados. Dentre os métodos conhecidos destacam-se aqueles que possuem a possibilidade de mensurar a opinião de especialistas do assunto através de formulações matemáticas. Dentre esses métodos merecem destaque as metodologias Bellman-Zadeh (Canha, 2004) e fuzzy (Zadeh, 1965) atualmente amplamente utilizadas em problemas multicritérios em sistemas de distribuição de energia.

Porém tais metodologias apesar de considerarem a opinião e estimativa de especialistas da área de estudo, não qualificam essas opiniões quanto a sua

consistência e importância, pressupondo que serão sempre verdades absolutas. Desta forma, especialistas com qualificações aquém do desejado sempre serão considerados, mesmo que suas avaliações converjam para uma solução distante do desejado.

Desta maneira, a metodologia *Analytic Hierarchy Process* (AHP) apresenta-se como uma solução adequada para essa restrição conforme é apresentado nos itens seguintes.

4.1. Introdução ao Analytic Hierarchy Process (AHP)

O AHP é uma metodologia de análise e decisão multicriterial que possui como princípio a hierarquização do problema e comparação entre os diversos critérios ou soluções possíveis através de matrizes de comparação, permitindo assim estabelecer um vetor de hierarquia das alternativas possíveis. Tal metodologia foi proposta inicialmente por Saaty (1980) que descreveu sua utilização para diversas áreas de conhecimento e problemas tais como:

- Escolha da melhor solução;
- Estabelecimento de prioridades;
- Alocação de recursos;
- Auxílio na formação de conjunto de soluções;
- Hierarquização de alternativas;
- Planejamento.

O conceito básico da metodologia AHP consiste na geração de avaliações por especialistas através da comparação par a par das diversas soluções ou critérios. De maneira conceitual a metodologia AHP consiste em resolver problemas complexos através da tomada de várias decisões mais simples.

4.2. Formalização Inicial do Problema

Para realizar a utilização da metodologia AHP, é imprescindível definir claramente os elementos que compõem a análise que se pretende realizar. Tais elementos são apresentados a seguir.

4.2.1. Objetivo Final ou Meta

É a decisão ou resposta para um dado problema, tais como a escolha de um projeto, a alocação ideal de um equipamento, a alocação de recursos, a escolha otimizada de uma solução e entre outros. O objetivo principal é representado no topo da estrutura de decisões do sistema AHP, podendo eventualmente estar dividido num segundo nível abaixo do principal, com objetivos secundários que permitam alcançar o objetivo principal.

4.2.2. Avaliação dos Critérios e Soluções

Para realizar a avaliação de um problema através da metodologia AHP é necessário mapear os critérios que serão avaliados, ou seja, como será mensurado o impacto de cada solução no problema como um todo e assim como verificar todas as soluções possíveis.

De maneira simplificada o sistema de análise é como apresentado na Figura 4.1.

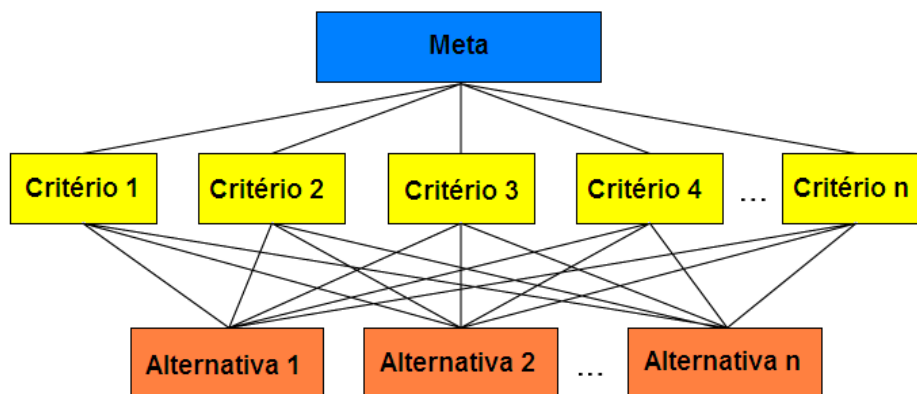


Figura 4.1 - Estrutura de três níveis no processo de hierarquização conceitual para análises.

Definido a estrutura do processo de decisão é possível realizar os julgamentos dos critérios e alternativas pelo especialista conforme item a seguir.

4.2.3. Julgamentos

A tomada de decisão multicriterial pode envolver inúmeros critérios a serem avaliados tornando sua busca por respostas complexa para o especialista. Deste modo uma maneira de simplificar essa avaliação utilizada pela metodologia AHP consiste em avaliar os critérios par a par, ou seja, realizar uma comparação paritária entre todos os elementos envolvidos no processo.

Nessa etapa que o especialista inicia o processo de priorização de todas as características envolvidas, sempre comparando paritariamente os critérios do mesmo nível tomando como objetivo o nível acima. São através dessas comparações que serão mensurados os valores de importância de cada critério, podendo ser considerados também critérios qualitativos concomitantemente com critérios quantitativos.

A comparação paritária é realizada pelo especialista sob os n critérios considerando o quanto mais ou menos importante um critério é em relação ao outro. Tal comparação inicialmente verbalizada é convertida em valores numéricos de 1 a

9, o que representa uma escala grande o suficiente para distinguir todas as intensidades de julgamento, porém não muito extensa a ponto de confundir o avaliador de acordo com Saaty (1990).

Escala Numérica	Escala Numérica
1	Igual Importância
3	Importância moderada
5	Importância essencial ou forte
7	Importância muito forte
9	Importância extrema
2,4,6 e 8	Valores intermediários

Quadro 4.1 – Representação numérica para comparações e julgamentos verbais.

Para cada nível em avaliação pode-se julgar seus elementos em relação ao nível acima, ou seja, para o exemplo anterior é possível julgar paritariamente os critérios em função da meta ou as alternativas possíveis em função de cada um dos critérios e assim sucessivamente. Em geral em problemas com soluções em quantidade muito elevada e critérios mais restritos, pode-se optar por realizar os julgamentos paritários somente com seus critérios em relação ao objetivo geral e com essa avaliação ponderar quantitativamente as soluções utilizando os critérios como pesos na avaliação final.

Baseado que cada critério deverá ser julgado em par com o critério seguinte, podemos definir uma matriz de comparação ou matriz de julgamento de dimensão $n \times n$ para n critérios em avaliação. Para o exemplo da Figura 1 proposto a comparação dos critérios em função do objetivo geral gera uma matriz de comparação conforme:

$$M = \begin{matrix} c1 \\ c2 \\ \vdots \\ cn \end{matrix} \begin{pmatrix} c1 & c2 & \dots & cn \\ 1 & a12 & \dots & a1n \\ 1/a12 & 1 & \dots & a2n \\ \dots & \dots & 1 & \dots \\ 1/a1n & 1/a2n & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

Onde:

- M - matriz de comparação dos critérios;

- c_i - Critério i em avaliação (não consta dentro da matriz, sendo utilizado como auxiliar na formação desta);
- a_{ij} - Julgamento da predominância do critério i sobre o critério j ;
- $\frac{1}{a_{ij}}$ - Julgamento da predominância do critério j sobre o critério i que é o inverso da predominância do critério i sobre o critério j ;

Para formatação da matriz de comparação dos critérios, o avaliador preenche seus valores avaliando linha por linha, ou seja, primeiro avalia o critério c_1 preenchendo toda a linha 1 e assim por diante até n linhas.

O preenchimento de cada célula pelo avaliador deve ser visto como o julgamento da predominância do critério da linha sobre o critério da coluna. Ou seja, na avaliação do elemento a_{ij} o que se determina é a predominância do critério i (linha) sobre o critério j (coluna), desta forma, sendo o critério i mais importante que o j , essa célula deverá receber um valor entre dois e nove conforme escala verbal prevista anteriormente. Ao mesmo tempo em que se o critério i for menos importante que o j esta célula receberá um valor inverso da avaliação postada na célula a_{ji} que representa a predominância do critério j sobre o i , ou seja, um valor entre 1/2 e 1/9. Desta forma as células a_{ij} e a_{ji} são sempre o inverso de um e outro. Já para as células onde $i = j$, ou seja, a avaliação da predominância do critério sobre ele mesmo, essas células sempre receberão valor igual 1 (um), porque o critério em avaliação sempre será igual a ele mesmo, desta forma a diagonal principal inicialmente é sempre preenchida com valor um.

Dado que existem algumas regras para o preenchimento da matriz de comparação o ideal é utilizar os especialistas apenas para apuração das comparações e que a montagem da matriz seja efetuada por algum técnico com compreensão do método, pois muitas vezes a solicitação do preenchimento da matriz pelos próprios especialistas gera muitas dúvidas e errôneos preenchimentos. Para realizar a apuração da opinião dos especialistas, é pertinente utilizar um questionário que torne mais amigável à avaliação da predominância dos critérios pelos especialistas e que também facilite a montagem da matriz de comparação conforme Saaty (1994).

A Figura 4.2 apresenta um modelo de questionário proposto por esse trabalho comparando diversos critérios entre si, no exemplo abaixo se devem avaliar os critérios A, B, C, D e E.

OBJETIVO AVALIADOR	META_ou_OBJETIVO_GERAL NOME_AVALIADOR		COMPARAÇÃO	CRITÉRIO 2
CRITÉRIO 1				
Critério A	1	<		> 1 Critério B
Critério A	1	<		> 1 Critério C
Critério A	1	<		> 1 Critério D
Critério A	1	<		> 1 Critério E
Critério B	1	<		> 1 Critério C
Critério B	1	<		> 1 Critério D
Critério B	1	<		> 1 Critério E
Critério C	1	<		> 1 Critério D
Critério C	1	<		> 1 Critério E
Critério D	1	<		> 1 Critério E

ESCALA NUMÉRICA	ESCALA VERBAL
1	Igual importância
3	Importância moderada
5	Importância essencial ou forte
7	Importância muito forte
2, 4, 6, 8	Importância extrema

Figura 4.2 - Questionário padrão proposto para julgamento de critérios da ferramenta desenvolvida.

O especialista deverá receber esse questionário e para cada uma das comparações mover o cursor da comparação em direção ao critério que julgar mais predominante. Baseado no questionário padrão proposto cada especialista irá realizar as ponderações entre um critério e o outro e conforme posicionar o cursor automaticamente já se determinar o valor equivalente numérico para cada uma das comparações. A Figura 4.3 exemplifica o preenchimento desse questionário.

OBJETIVO AVALIADOR	META_ou_OBJETIVO_GERAL NOME_AVALIADOR	CRITÉRIO 1	COMPARAÇÃO	CRITÉRIO 2
Critério A		6	< >	Critério B
Critério A		3	< >	Critério C
Critério A		4	< >	Critério D
Critério A		4	< >	Critério E
Critério B			< >	Critério C 3
Critério B			< >	Critério D 4
Critério B		2	< >	Critério E
Critério C			< >	Critério D 3
Critério C		2	< >	Critério E
Critério D		3	< >	Critério E

ESCALA NUMÉRICA	ESCALA VERBAL
1	Igual importância
3	Importância moderada
5	Importância essencial ou forte
7	Importância muito forte
2, 4, 6, 8	Importância extrema

Figura 4.3 –Exemplo de preenchimento do questionário proposto da ferramenta desenvolvida.

No exemplo anterior, verifica-se que na avaliação do especialista o critério A tem uma importância moderada sob o critério C, dado que este moveu o cursor desta comparação levemente em direção ao critério A, habilitando automaticamente o a escala numérica igual a três e assim é estabelecido para os demais os critérios. Para o exemplo acima a matriz de comparação resulta:

$$M = \begin{matrix} & \begin{matrix} A & B & C & D & E \end{matrix} \\ \begin{matrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 6 & 3 & 4 & 4 \\ 1/6 & 1 & 1/3 & 1/4 & 2 \\ 1/3 & 3 & 1 & 1/3 & 2 \\ 1/4 & 4 & 3 & 1 & 3 \\ 1/4 & 1/2 & 1/2 & 1/3 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (4.2)$$

E assim determina-se a matriz de comparação para qualquer quantidade de critérios em avaliação, sendo que para a utilização do método AHP no mínimo

devem ser avaliados três critérios e recomenda-se a utilização de no máximo nove critérios (Saaty, 1980).

Para montagem desse questionário padrão a metodologia AHP necessita a formatação de diversas comparações entre os critérios assim definidas:

$$Q_{ci} = n - i \quad (4.3)$$

Onde:

- Q_{ci} - Quantidade de comparações iniciadas pelo critério i ;
- n - Total de critérios avaliados
- i - Critério em avaliação;

Ou seja, para o exemplo anterior onde é avaliado cinco critérios tem-se que para o critério 1 (Critério A) é necessário iniciar-se 4 comparações iniciadas com o critério A, já para o critério 2 (Critério B) é necessário iniciar-se 3 comparações com o critério B e assim sucessivamente, até que para o último critério não é mais necessário iniciar nenhuma comparação com esse, pois já foi contemplado nas comparações anteriores.

A quantidade total de comparações necessário para aplicação do método AHP é baseada:

$$Q_t = \frac{n \cdot (n - 1)}{2} \quad (4.4)$$

Onde:

- Q_t - Quantidade total de comparações necessárias;
- n - Total de critérios avaliados

Desta forma, para o exemplo anterior com um total de 5 avaliados é necessário um total de 10 comparações conforme consta no questionário apresentado.

4.3. Solução Matemática do Problema

A solução do método AHP depois de formatada a matriz de comparação dos critérios avaliados é obtido através da determinação do autovetor desta matriz.

O processo de solução se inicia determinando-se o vetor de prioridades da matriz M , que é a matriz de comparação. De acordo com Saaty (2003) a resolução desse vetor deve obedecer ao teorema de que o vetor de prioridades deve satisfazer a relação $Mx = Cx$, sendo C uma constante e $C > 0$ e ainda que o vetor de prioridades deva ser um valor positivo e múltiplo do autovetor da matriz M e C é o autovalor máximo dessa matriz.

A matriz de comparação M para matrizes consistentes são mais bem representados pela composição dos pesos relativos dos critérios i e j através da composição w_i/w_j , pois são de fácil e empírico preenchimento. Considera-se uma matriz como consistente aquela que satisfaz as seguintes igualdades:

$$\begin{aligned} a_{ji} &= 1 / a_{ij} \\ a_{ij} \times a_{jk} &= a_{ik} \end{aligned} \tag{4.5}$$

Onde:

- a_{ij} , a_{ji} , a_{jk} e a_{ik} - elementos da matriz de comparação M .

Porém de acordo com Saaty (2003) uma consistência tão absoluta como esta não é possível, por esse motivo que a notação $Mx = Cx$ de seu teorema indica uma matriz muito próxima da consistência absoluta, mas que apresenta pequenas perturbações no conteúdo da matriz.

Para uma matriz consistente tem-se que $M: M^k = n^{k-1}M$, $M=(w_i/w_j)$. Já para uma Matriz quase consistente temos:

$$M = W \circ E \tag{4.6}$$

Onde:

- $W = (w_i / w_j)$;
- $E = (\varepsilon_{ij})$;
- $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji}^{-1}$.

Sendo que \mathcal{E}_{ij} representam as pequenas perturbações as quais a matriz de comparação está submetida, ou seja, cada elemento da matriz consistente terá para si um termo de perturbação permanecendo $a_{ij}\mathcal{E}_{ij}$. Assim, a contribuição dessas perturbações pode ser definida como:

$$\sum_{j=1}^n \mathcal{E}_{ij} = \sum_j a_{ij}w_j / w_i = [Mw]_i / w_i = \lambda_{\max} w_i / w_i = \lambda_{\max} \quad (4.7)$$

Onde:

- λ_{\max} - autovalor de mensuração das perturbações de cada critério i .

Dessa forma, as perturbações existentes na matriz de comparação podem ser representadas por um valor λ_{\max} que determinará o valor total dessas perturbações para cada um dos critérios i .

Assim, a representação da matriz de comparação poderá permanecer como:

$$M = W \cdot \lambda_{\max} \quad (4.8)$$

Onde:

- $W = (w_i / w_j)$.

De maneira descritiva obtém:

$$M = \begin{pmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \dots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_n \end{pmatrix} \times \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = \lambda_{\max} \times \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Onde:

- M - matriz de comparação;
- w_{ij} - Julgamentos;
- λ_{\max} - autovalor de mensuração das perturbações de cada critério i .

Desta maneira, a solução dos valores da matriz original $Mx = Cx$ pode ser determinada pelo cálculo do autovetor e do autovalor da representação $M = W \cdot \lambda_{\max}$ sendo o vetor \bar{W} o autovetor principal e λ_{\max} seu autovalor máximo.

Calculado o autovetor de cada matriz, tem-se que:

$$P_i = W_i \quad (4.10)$$

Onde:

- P_i - Prioridade final do critério i ;
- W_i - Elemento i do autovetor principal.

Desta forma, com a matriz de comparação formatada obtêm-se os valores de prioridade de cada critério de acordo com a opinião do especialista.

4.4. Solução Aproximada

A busca por uma solução da metodologia AHP através de uma maneira simplificada e conseqüentemente mais aproximada, não tem por objetivo facilitar o cálculo dos índices de prioridade finais, já que esses não exigem muito esforço computacional. Porém, o objetivo é promover uma maneira rápida e intuitiva para que um especialista que conheça a metodologia AHP possa rapidamente calcular os índices de prioridade dos critérios que avaliou.

Baseado no apresentado em Saaty (1990) e em Saaty (2003) tem-se uma metodologia de rápida aplicação e que será utilizada como base nesse trabalho. Como base de solução é utilizada a matriz de comparação disposta abaixo.

$$M = \begin{pmatrix} W_1/W_1 & W_1/W_2 & \dots & W_1/W_n \\ W_2/W_1 & W_2/W_2 & \dots & W_2/W_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \dots \\ W_n/W_1 & W_n/W_2 & \dots & W_n/W_n \end{pmatrix} \quad (4.11)$$

Para solução desse problema toma-se como base o cálculo de prioridade do critério k representado pela linha k, para se obter o valor final P_k .

Inicialmente deve normalizar a soma da linha da matriz em avaliação pelo índice de referencia que é a célula da linha que pertence à diagonal principal da matriz, ou seja, tem-se:

$$S_k = \frac{\sum_j W_{kj}}{W_{kk}} \quad (4.12)$$

Onde:

- S_k - Somatório da linha k;
- W_{kj} - Células pertencentes linha k;
- W_{kk} - Elemento pertence à diagonal principal da matriz M e que consta na linha k;

Posteriormente realiza-se a soma de todos os elementos da matriz conforme:

$$S_M = \sum_j \frac{1}{W_{kj}} \times \sum_j W_{kj} \quad (4.13)$$

Onde:

- S_M - Somatório de todos os elementos da Matriz.

E por fim executa-se a divisão de S_k por S_M que é o valor da prioridade k em análise, conforme:

$$P_k = \frac{\frac{\sum_j W_{kj}}{j}}{W_{kk}} \quad (4.14)$$

$$P_k = \frac{\sum_j \frac{1}{W_{kj}} \times \sum_j W_{kj}}{W_{kk}}$$

Onde:

- P_k - Índice de prioridade do critério k.

E desta maneira, obtêm-se o valor de cada uma das prioridades executando apenas somatórios de linhas e divisões.

Tal metodologia prova-se muito útil, pois permite ao especialista com compreensão da metodologia AHP uma solução rápida e aproximada dos valores de prioridades para o problema proposto. Neste trabalho utiliza-se essa abordagem na utilização da metodologia AHP.

4.5. Medida de Inconsistência das Informações

A metodologia AHP utiliza como base de solução a opinião de especialistas. E por mais lógicas e exatas sejam as respostas obtidas pelo método o que ocorre de fato é que sua fonte de alimentação de informações é baseada no fator humano, muitas vezes envolvido emocionalmente no problema ou baseando-se muito mais suas respostas na solução do problema em percepções e intuição do que propriamente em constatações técnicas.

Dado esses fatores, eventualmente é possível num processo de avaliação dos critérios, em função da complexidade do problema ou da pouca afinidade do especialista com o tema, encontrar avaliações dos critérios com certo grau de inconsistência nos julgamentos realizados.

Empiricamente é possível verificar inconsistências mais abruptas nos julgamentos dos critérios, por exemplo, se o Critério A for julgado como mais importante que o B e o B como mais importante que o C é natural de se esperar que o A seja mais importante que o C. Porém como demonstrado anteriormente matrizes de comparação nunca serão absolutamente consistentes e apenas algumas inconsistências não devem invalidar todos os julgamentos do especialista, porém assim como a presença de muitas inconsistências como essa deverá invalidar a avaliação do especialista.

Por esses motivos é que o método AHP propõe o cálculo de uma medida de inconsistência das informações prestadas pelo especialista, sendo este um dos grandes diferenciais da metodologia em relação às demais metodologias de tomada de decisão multicriterial.

A verificação do índice é baseada na determinação de um índice de consistência (IC) de acordo com Saaty (2007) em função dos valores de autovalores encontrados para a matriz de comparação formatada.

Baseado na representação da matriz de comparação por inicialmente deve-se determinar todos de autovalores do autovetor principal. Tem-se como base a matriz de comparação abaixo.

$$M = \begin{pmatrix} W1/W1 & W1/W2 & \dots & W1/Wn \\ W2/W1 & W2/W2 & \dots & W2/Wn \\ \vdots & \vdots & \ddots & \dots \\ Wn/W1 & Wn/W2 & \dots & Wn/Wn \end{pmatrix} \times \begin{bmatrix} W1 \\ W2 \\ \vdots \\ Wn \end{bmatrix} = \lambda_{\max} \times \begin{bmatrix} W1 \\ W2 \\ \vdots \\ Wn \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

Considerando que os elementos W_i dessa matriz são os equivalentes aos índices de prioridades P_k calculados no modo simplificado, cada autovalor k pode ser determinado conforme:

$$\lambda_k = \frac{\sum_j (W_{kj} \times P_j)}{P_k} \quad (4.16)$$

Onde:

- λ_k - Autovalor de cada critério k ;
- P_j e P_k - Índice de prioridade do critério j e k respectivamente;
- W_{kj} - Julgamentos da matriz de comparação.

Verificado todos os autovalores determina-se o autovalor máximo:

$$\lambda_{\max} = \max_{k=1, \dots, n} \lambda_k \quad (4.17)$$

Onde:

- λ_{\max} - Autovalor máximo de todos dos critérios;
- λ_k - Autovalor de cada critério k .

Determinado o autovalor máximo é possível determinar o IC da avaliação do especialista conforme Saaty (2007):

$$IC = \frac{\lambda_{máx} - n}{n - 1} \quad (4.18)$$

Onde:

- IC - Índice de consistência geral da avaliação do especialista;
- n - quantidade de critérios avaliados.

O índice de consistência determina a coerência geral das informações prestadas pelo especialista, porém deve-se considerar que quanto mais critérios forem avaliados, mais difícil é de se manter uma consistência alta em função da complexidade do problema apresentado.

Por esse motivo é que se introduz o conceito de razão da consistência (RC) que leva em consideração a consistência geral das informações, mas que estabelece um atenuante nesse valor em função da quantidade de critérios avaliados, ou seja, quanto mais critérios forem utilizados, maior é a tolerância a inconsistências mais elevadas, sendo estabelecido da seguinte forma:

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (4.19)$$

Onde:

- RC - Razão da consistência;
- IC - Índice de consistência;
- IR - Índice randômico de consistência.

Para o cálculo de RC o atenuante IR é estabelecido conforme:

Quantidade de Critérios	Valor IR	RC Máximo
1	0,00	0,00
2	0,00	0,00
3	0,52	0,05
4	0,89	0,08
5	1,11	0,10
6	1,25	0,10
7	1,35	0,10
8	1,40	0,10
9	1,45	0,10
10	1,49	0,10
11	1,52	0,10
12	1,54	0,10
13	1,56	0,10
14	1,58	0,10
15	1,59	0,10

Quadro 4.2 –Valores do índice randômico de consistência conforme Saaty (2007).

Nesse quadro é indicado o valor de *IR* dependendo da quantidade de critérios avaliados e também o nível máximo admissível de *RC* para validar as informações prestadas, determinando a consistência final das informações do especialista. Ou seja, quanto maior for o valor de *RC* mais dispersas são as informações prestadas e por consegüentemente mais inconsistente é a avaliação realizada.

Em geral, um nível de consistência de 0.10 (10%) é tolerável, com exceção de avaliações com quatro e três critérios que possuem limites de 0.08 (8%) e 0.05 (5%) respectivamente.

Para situações em que se violam esses limites aconselha-se ao especialista revisar sua avaliação ou até descartar as informações prestadas, pois possivelmente o especialista não possui afinidade com o problema proposto. Porém eventualmente depara-se com problemas muito complexos e com interesses diversos, nesses casos é desejável obter-se um meio de integralizar diversas opiniões de especialistas de áreas diferentes para obter-se uma resposta mais harmônica ao problema apresentado, o que é possível conforme será visto no item a seguir.

4.6. Integralização de julgamentos

Em muitos problemas é necessário envolver diversas áreas e especialistas no processo de tomada de decisão, o que muitas vezes executasse buscando o consenso entre os envolvidos com o intuito de encontrar a melhor solução dentre aquelas apresentadas como possíveis para atingir o objetivo principal. Porém em função dos diversos interesses e perspectivas de cada setor sobre o problema e do nível de experiência de cada especialista dependendo do tipo de problema em análise poderá não haver consenso nas avaliações realizadas.

Para tanto a solução consiste em realizar as avaliações separadamente e buscar um meio de integrá-las em uma solução única, mas que considere a opinião de todos os envolvidos no processo decisório. Ou seja, para a metodologia AHP a solução é aplicar os questionários individualmente e posteriormente integrar aqueles julgamentos de interesse ou que apresentaram maior consistência nas informações.

Em posse dos questionários a serem integrados, é formatada a matriz de comparação de cada um dos especialistas e a integralização de cada célula a_{ij} dessas matrizes numa célula a_{ij} final. A solução encontrada como a mais adequada para esse problema de acordo com Saaty (2005) consiste em realizar a média geométrica de cada elemento a_{ij} de cada matriz de cada especialista e assim obter um valor de a_{ij} para formatação de uma matriz de comparação integralizada, conforme:

$$\bar{X}_g = \prod_{i=1}^n X_i^{1/n} \quad (4.20)$$

Onde:

- \bar{X}_g - média geométrica de cada elemento a_{ij} ;
- X_i - elemento a_{ij} das matrizes de comparação de cada especialista i ;
- n - número de especialistas que terão seus julgamentos integralizados;

Desta forma, a matriz de comparação integralizada é composta por novos elementos a_{ij} que são calculados com base na fórmula acima determinando o \bar{X}_g de cada célula, conforme:

$$\bar{M}_g = \begin{matrix} & \begin{matrix} c1 & c2 & \dots & cn \end{matrix} \\ \begin{matrix} c1 \\ c2 \\ \vdots \\ cn \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & \bar{X}_{g12} & \dots & \bar{X}_{g1n} \\ 1/\bar{X}_{g12} & 1 & \dots & \bar{X}_{g2n} \\ \dots & \dots & 1 & \dots \\ 1/\bar{X}_{g1n} & 1/\bar{X}_{g2n} & \dots & 1 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (4.21)$$

Onde:

- \bar{M}_g - matriz de comparação integralizada;
- c_i - Critério i em avaliação;
- $\bar{X}_{g ij}$ - critério integralizado que representa a predominância do critério i sobre o critério j;
- $1/\bar{X}_{g ij}$ - critério integralizado que representa a predominância do critério j sobre o critério i;

Contudo, Saaty (2005) adverte que tal integralização apresenta resultados adequados quando se utilizam julgamentos de especialistas que apresentam resultados não dispersos, caso contrário a média geométrica não apresentará resultados representativos do conjunto de especialistas. Isso ocorre quando um dado problema é avaliado por especialistas de áreas muito distintas, por exemplo, em sistemas de distribuição de energia elétrica a avaliação da necessidade do incremento da quantidade de equipes é avaliada de maneira muito distinta quando especialistas da área técnica avaliam em contrapartida a avaliação de especialistas da área financeira, nesses casos o adequado é identificar uma resposta final sob a perspectiva técnica e outra sob a perspectiva financeira.

5. ALOCAÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE MANOBRA TELECOMANDADOS

A operação de sistemas de energia com segurança e confiabilidade são umas das grandes preocupações das empresas de energia. Nesse contexto as distribuidoras de energia elétrica têm buscado soluções que permitam melhorar constantemente seu desempenho, destacando-se a possibilidade de adoção de equipamentos telecomandados que permitam o gerenciamento e monitoramento de sua rede e com isso proporcionar ganhos diversos como redução de perdas, redução de indicadores de continuidade, entre outros. O grande diferencial na utilização desses equipamentos consiste na obtenção de respostas rápidas na ocorrência de qualquer evento no sistema, dispensando a necessidade de equipes em parte do trabalho a ser executado, possibilitando assim uma utilização mais adequada desses recursos em outras atividades.

Porém, a decisão de instalação de equipamentos automatizados em redes de distribuição demanda um alto investimento e necessita de planejamento. Desta maneira, é necessário definir uma metodologia que avalie o impacto da instalação desses dispositivos e assim por consequência sua alocação ótima.

5.1. Definições Iniciais

Para resolução do problema de alocação de equipamentos é necessário determinar as premissas iniciais para formatação do algoritmo que será utilizado para definir a localização ótima desses dispositivos, entre estes se destacam:

a) Definição do objetivo geral

O objetivo geral da análise é estabelecer uma metodologia que permita mensurar os resultados da instalação de equipamentos de manobra telecomandados em diversos pontos e assim definir a alocação ótima desses dispositivos considerando diversos critérios em análise.

b) Abrangência da análise

A definição da abrangência do problema consiste em definir qual serão os sistemas em avaliação que disputarão a instalação desses equipamentos telecomandados, podendo ser avaliado somente uma subestação, uma regional da empresa especificamente ou até toda a área de concessão da empresa de distribuição de energia elétrica

c) Estratégia de operação

A instalação de equipamentos telecomandados poderá ser executada em pontos normalmente fechados (NF) ou em pontos normalmente abertos (NA). A instalação em pontos NF tem como objetivo o seccionamento automático da rede de distribuição para isolação de defeitos, pois para defeitos ocorridos a jusante do equipamento é possível realizar a abertura dessa chave possibilitando a reenergização do alimentador permanecendo com alimentação somente a montante da chave reduzindo assim os indicadores globais de parte do alimentador. Já a instalação de equipamentos NA possibilita que quando seccionado manualmente um equipamento de manobra após um defeito é possível reenergizar os clientes a jusantes dessa chave fechando automaticamente a chave NA telecomandada transferindo esses clientes para outra fonte de alimentação.

Como estratégia de operação definiu-se que o ideal é sempre a instalação de pares de equipamentos telecomandados, ou seja, um dispositivo em um ponto NF e outro em um ponto NA, pois assim havendo defeitos a jusante ou a montante da chave NF telecomandada, sempre será possível realizar o chaveamento desses equipamentos que possibilitem a alimentação de parte dos clientes do alimentador.

d) Restrições operacionais

Em geral equipamentos de manobra telecomandados são utilizados para situações de contingência que se desviam do regime normal de operação para qual o sistema foi projetado e planejado para operar. Desta maneira, é comum distribuidoras de energia elétrica flexibilizar os limites operacionais de seus equipamentos com o intuito de atender o máximo de consumidores quando seus sistemas estão submetidos a situações de contingências.

Desta maneira, para a solução de problema de alocação de equipamentos de manobra telecomandados, como serão identificados pontos para instalação de

dispositivos NA com o intuito de promover a transferência de carga, esses limites operacionais deverão ser considerados nesta avaliação.

Nesse trabalho será admissível em situações de contingências um carregamento máximo de até 110% da capacidade nominal dos condutores de todos os trechos e um nível de tensão mínimo de 90% em relação ao valor nominal do sistema (AES Sul, 2008) e (AES Sul, 2010).

e) Funções objetivas (Critérios considerados)

Para determinar o nível de prioridade e desempenho que a instalação de um par de equipamentos telecomandados representa na solução desse problema serão avaliados os seguintes critérios:

- Redução DEC: Baseado na análise da instalação da chave telecomandada e no histórico de interrupções é verificado o valor de DEC reduzido;

- Redução FEC: Baseado na análise da instalação da chave telecomandada e no histórico de interrupções é verificado o valor de FEC reduzido;

- ENS: Baseado na análise da instalação da chave telecomandada e no histórico de interrupções é verificado o valor de ENS evitado;

Todos os indicadores acima são calculados conforme Capítulo 3 deste trabalho e para todos, o objetivo é determinar a solução que máxime esses valores e represente a solução mais harmônica para todos os critérios.

f) Análise de priorização

Determinado todos os ganhos em DEC, FEC e ENS que cada par de equipamentos telecomandados proporcionam, a priorização será em ordem decrescente ao ganho total que cada par de equipamentos representa de acordo com a metodologia apresentada a seguir, utilizando a análise multicriterial AHP descrita anteriormente.

5.2. Algoritmo de Alocação Chaves Telecomandadas

Baseado na metodologia apresentada no Capítulo 3 utilizando a MLE para determinar os valores dos indicadores de continuidade, é avaliado o impacto que a

instalação de equipamentos telecomandados terá na redução desses indicadores considerando a topologia de rede atual e a topologia operando com esses equipamentos telecomandados quando submetido a defeitos.

Como referencia para a análise será considerando um sistema de distribuição de energia simplificado conforme demonstrado no Capítulo 3 e rerepresentando abaixo. Para o sistema demonstrado se considera inicialmente que a chave NA localizada na barra cinco é uma interligação entre o alimentador demonstrado e outro alimentador que inicialmente pressupõe-se que possui capacidade de receber acréscimos de cargas.

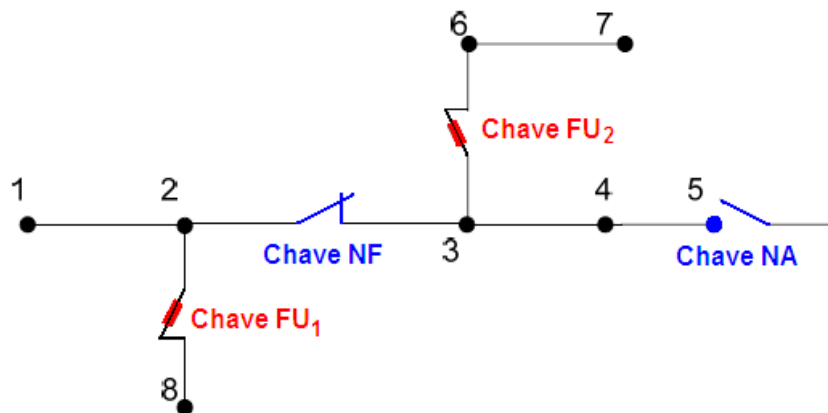


Figura 5.1 – Sistema de distribuição de energia simplificado.

Conforme descrito no Capítulo 3 a avaliação do sistema em contingências o tempo de restabelecimento do sistema é dividido em categorias conforme:

- Tempo de Reparo (t_r): O tempo necessário para adequar o restabelecimento de energia é definido como o tempo de reparo do sistema;

- Tempo Isolamento (t_i): Para defeitos a jusantes de chaves NF será possível promover o isolamento do trecho defeituoso em relação à rede de distribuição a montante desse equipamento, ou seja, o tempo de restabelecimento para esses

trechos a montantes do equipamento é descrito como tempo de isolamento (t_i) do defeito;

- Tempo de Transferência (tt): Para defeitos a montante de uma chave NF que possuam um uma chave NA a jusante desse e que interligue com outra fonte de suprimento com capacidade de receber acréscimos de carga, é possível promover a transferência dos clientes. Consumidores a jusante da chave NF para essa nova fonte de alimentação, substituindo o tempo de restabelecimento desses clientes pelo tempo de transferência (tt). Esse tempo de transferência é usualmente composto por tempo de espera (t_e) até a disponibilização de equipe de para realização do procedimento, tempo de deslocamento (t_d) da equipe até o local definido e tempo de manobra (t_m).

Definido esses tempos e considerando que se tratando de tempos médios deve-se considerar a taxa de falhas λ dos sistemas, a matriz lógico estrutural do sistema simplificado permanece conforme:

	Trechos/Nós com defeito							
Nó Inicial	1	2	3	4	5	6	7	8
1	tr1. λ 1	tr2. λ 21	ti. λ 3	ti. λ 4	ti. λ 5	0	0	0
2	tr1. λ 1	tr2. λ 2	ti. λ 3	ti. λ 4	ti. λ 5	0	0	0
3	tt. λ 1	tt. λ 2	tr3. λ 3	tr4. λ 4	tr5. λ 5	0	0	0
4	tt. λ 1	tt. λ 2	tr3. λ 3	tr4. λ 4	tr5. λ 5	0	0	0
5	tt. λ 1	tt. λ 2	tr3. λ 3	tr4. λ 4	tr5. λ 5	0	0	0
6	tt. λ 1	tt. λ 2	tr3. λ 3	tr4. λ 4	tr5. λ 5	tr6. λ 6	tr7. λ 7	0
7	tt. λ 1	tt. λ 2	tr3. λ 3	tr4. λ 4	tr5. λ 5	tr6. λ 6	tr7. λ 7	0
8	tr1. λ 1	tr2. λ 2	ti. λ 3	ti. λ 4	ti. λ 5	0	0	tr8. λ 8

Quadro 5.1 – MLE integralizada do sistema simplificado.

Considerando o sistema proposto pode-se avaliar o impacto que a instalação de equipamentos telecomandados pode causar no sistema, para tanto se devem reavaliar os tempos conforme:

- Tempo Isolamento (t_i): Para falhas a jusantes da chave NF, é necessário apenas o seccionamento do sistema com a abertura da chave NF, sendo esta

telecomandada e considerando que essa identifica a falha automaticamente, esse tempo pode ser considerado igual a zero ($t_i = 0$);

- Tempo de Transferência (tt): Para falhas a montante da chave NF, faz-se necessário a manobra de dois equipamentos telecomandados promovendo a abertura da chave NF e o fechamento da chave NA, como tal processo depende da disponibilidade do operador do sistema, verificação da viabilidade técnica de execução da manobra e entre outros fatores, esse tempo de transferência não pode ser considerado igual a zero, porém será inferior ao tempo anterior, sendo redefinido como tempo de transferência automático (tta) que é o tempo de transferência excluindo-se o tempo de espera e deslocamento da equipe.

Estabelecido essas premissas a MLE anterior poderá ser reescrita conforme:

Nó Inicial	Trechos/Nós com defeito							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	tr1.λ1	tr2.λ21	0	0	0	0	0	0
2	tr1.λ1	tr2.λ2	0	0	0	0	0	0
3	tta.λ1	tta.λ2	tr3.λ3	tr4.λ4	tr5.λ5	0	0	0
4	tta.λ1	tta.λ2	tr3.λ3	tr4.λ4	tr5.λ5	0	0	0
5	tta.λ1	Tta.λ2	tr3.λ3	tr4.λ4	tr5.λ5	0	0	0
6	tta.λ1	tta.λ2	tr3.λ3	tr4.λ4	tr5.λ5	tr6.λ6	tr7.λ7	0
7	tta.λ1	tta.λ2	tr3.λ3	tr4.λ4	tr5.λ5	tr6.λ6	tr7.λ7	0
8	tr1.λ1	tr2.λ2	0	0	0	0	0	tr8.λ8

Quadro 5.2 – MLE integralizada do sistema com a instalação de equipamentos telecomandados nos pontos NF e NA.

Definida a nova MLE é possível calcular o impacto da instalação dos equipamentos telecomandados calculando-se para essa nova MLE os indicadores de continuidade DEC, FEC e ENS e compará-los com os indicadores calculados inicialmente determinando os benefícios proporcionados pela instalação dos equipamentos como a redução do DEC, redução do FEC e ENS evitado.

Desta maneira, a busca de soluções possíveis inclui testar a instalação de um equipamento telecomandado em um ponto de chave NF que possua a jusante um ponto de chave NA, possibilitando assim formatar uma nova MLE do sistema em análise e desta recalculer seus indicadores de continuidade comparando-os com os

indicadores originais do sistema para determinar os valores de redução de DEC, redução de FEC e ENS evitado.

Esse processo de busca é realizado inúmeras vezes de maneira a testar cada par de equipamentos candidatos a serem telecomandados, com o intuito de determinar os ganhos nos indicadores de continuidade de todos os pontos testados.

Porém, como a estratégia de operação proposta pressupõe a instalação de pares de equipamentos telecomandados, é necessário sempre validar se a outra fonte de suprimento que interliga o ponto NA possui capacidade operacional para receber o montante de carga proveniente da abertura do ponto NF. Ou seja, para cada ponto testado é necessário calcular um novo fluxo de potência considerando a operação da nova fonte de suprimento considerando essa já suprindo a carga proveniente da abertura da chave NF e fechamento da chave NA. Para tanto é verificado se não haverá alguma restrição operacional como sobrecarga em condutores ou elevada queda de tensão, considerando os limites técnicos para contingências conforme descrito anteriormente.

Tal restrição exigirá mais esforço computacional na aplicação da metodologia, porém também reduzirá drasticamente a quantidade de pontos necessários para testar, pois na inviabilidade técnica de utilizar um ponto NF e NA, outros pontos NF a montante desse último testado é eliminada, pois também apresentarão restrições quando testados com o mesmo ponto NA.

5.3. Priorização das Soluções

Determinado todos os pontos possíveis de receberem equipamentos telecomandados e o ganho em indicadores de continuidade que estes geram, a solução mais adequada é aquela que apresentar os melhores resultados nos três critérios propostos. Porém como não haverá uma solução unânime para todos os critérios e considerando que esses são em grandezas diferentes e possuem níveis de importâncias diferentes é necessário determinar a solução mais harmônica.

Na solução desse problema, defini-se como necessário determinar três premissas principais, sendo:

- Otimização desejada: Significa definir se para o problema avaliado o ideal é buscar pela solução máxima ou a busca pela solução mínima, por exemplo, sendo que para uma decisão multicriterial os critérios em avaliação poderão ter buscas de otimização diferentes;

- Uniformizar Escalas: Em análises multicriteriais na maioria das vezes os critérios avaliados são mensurados em unidades e escalas diferentes impossibilitando qualquer comparação entre os critérios, desta forma é pertinente a adoção de alguma metodologia que normalize esses valores para uma escala única que permita essa integralização;

- Nível de Otimização: Para o solução do problema é necessário considerar que cada critério pode ser mais preponderante na otimização do problema, sendo importante definir um vetor de prioridades que represente a importância dos critérios avaliados.

Utilizando as etapas propostas acima, a primeira premissa é a definição conceitual dos critérios avaliados em relação ao problema proposto. Para a solução de um dado problema os critérios avaliados terão como função objetivo a maximização ou minimização de seus valores principais para proporcionar a solução ótima desse problema, ou seja, para problemas de maximização e minimização tem-se respectivamente:

$$F_i \rightarrow \text{máx} \quad (5.1)$$

$$F_i \rightarrow \text{min} \quad (5.2)$$

Onde:

- F_i - Critério i em avaliação;
- *máx* - Otimização buscando a maximização;
- *min* - Otimização buscando a minimização.

Em uma avaliação critério a critério, ou seja, considerando o problema unicriterial tem-se como a solução mais adequada àquela que ficar mais próxima do valor de otimização buscado, ou seja, para otimização maximização e minimização tem-se respectivamente:

$$Obj = \arg \mathit{m\acute{a}x}^{F_{ij}} \quad (5.3)$$

$$Obj = \arg \mathit{m\acute{i}n}^{F_{ij}} \quad (5.4)$$

Onde:

- Obj - Objetivo da análise;
- $\arg \mathit{m\acute{a}x}^{F_{ij}}$ - Valor que representa o valor máximo dentre todas as soluções j para o critério i ;
- $\arg \mathit{m\acute{i}n}^{F_{ij}}$ - Valor que representa o valor mínimo dentre todas as soluções j para o critério i .

Desta forma, na busca da solução para o problema de alocação de equipamentos de manobra telecomandados, tem-se como solução ótima aquela que apresentar as melhores respostas para os critérios avaliados, sendo que para cada um dos critérios busca-se a seguinte otimização:

- Redução de DEC: Para esse critério a otimização é a maximização do valor, ou seja, quanto maior o valor de redução de DEC melhor será a solução;

- Redução de FEC: Para esse critério a otimização também é a maximização do valor, ou seja, quanto maior o valor de redução de FEC melhor será a solução;

- ENS evitado: Também para esse critério a otimização é a maximização do valor, ou seja, quanto maior o valor de ENS evitado melhor será a solução.

Dentro das etapas propostas, a segunda premissa determina que para permitir que os critérios sejam avaliados conjuntamente é necessário que seus valores estejam sob uma escala única. Porém para o proposto têm-se as seguintes unidades e escalas:

- Redução de DEC: Mensurado em horas e com valores positivos e maiores ou iguais a zero;

- Redução de FEC: Mensurado em quantidade de vezes e com valores positivos e maiores ou iguais a zero;

- ENS evitado: Mensurado em kWh (energia) e com valores positivos e maiores ou iguais a zero.

Desta forma, têm-se três critérios e que são avaliados sob unidades diferentes, impossibilitando uma avaliação integralizada se avaliados com seus valores naturais. Assim é necessário normalizar seus valores naturais para uma escala única e comum a todos os critérios, de acordo com o tipo de otimização de cada critério, ou seja, para otimização maximização e minimização tem-se respectivamente (Daza, 2009):

$$C_{ij} = \frac{F_{ij}}{\mathit{m\acute{a}x}F_{ij}} \quad (5.5)$$

$$C_{ij} = \frac{\mathit{m\acute{i}n}F_{ij}}{F_{ij}} \quad (5.6)$$

Onde:

- C_{ij} - Solução normalizada j para critério i em escala adimensional;
- F_{ij} - Solução j para critério i em valores naturais;
- $\mathit{m\acute{a}x}F_{ij}$ - Máximo valor de todas as soluções j para critério i em valores naturais;
- $\mathit{m\acute{i}n}F_{ij}$ - Mínimo valor de todas as soluções j para critério i em valores naturais.

A terceira e última etapa proposta, é a integralização de todos os critérios normalizados considerando o nível de otimização e preponderância que cada critério possui sob a solução final do problema.

Para efetivar a integralização de todos os critérios é necessário efetuar a soma de todos os critérios normalizados, sendo estes ponderados pelo seu nível de prioridade. A prioridade de cada critério é definida e determinada conforme apresentado no Capítulo 4 através da metodologia AHP. Desta forma, o valor

numérico final de cada solução, que representa o nível de ganho integralizado que cada solução apresenta é definida conforme (Daza, 2009):

$$RF_j = \sum_i P_i C_{ij} \quad (5.7)$$

Onde:

- RF_j - Resposta final para cada solução j ;
- P_i - Prioridade de cada critério i ;
- C_{ij} - Solução normalizada j para critério i em escala adimensional;

Assim definidos todos os valores de resposta final para cada uma das soluções encontradas, a solução ótima para o problema proposto é aquela que apresentar o maior valor de RF_j , o que matematicamente é definido conforme:

$$OF = \arg \text{máx} RF_j \quad (5.8)$$

Onde:

- OF - Objetivo Final;
- $\arg \text{máx} RF_j$ - Valor que representa o valor máximo dentre todas as respostas finais das soluções j ;

Para o problema de alocação de equipamentos de manobra telecomandados, dependendo da disponibilidade de recursos é possível definir uma lista de soluções adequadas que deverão ser priorizadas em ordem decrescente de cada um de suas respectivas respostas finais RF_j .

6. RESULTADOS PRÁTICOS E DISCUSSÃO

Para realizar uma avaliação real da metodologia proposta é realizado um estudo de caso através de uma ferramenta computacional que permite aplicar a metodologia proposta em uma topologia de rede de distribuição real da concessionária de energia AES Sul.

A ferramenta computacional possibilita interpretar a topologia de uma rede distribuição realizando o cálculo de fluxo de potência através dos dados de carga constantes no banco de dados da empresa. O cálculo de fluxo de potência na resolução do problema é importante, pois além de avaliar a condição do alimentador em análise é necessário para verificar as possibilidades de transferência de carga que deverão ser testadas na alocação dos equipamentos telecomandados.

A ferramenta computacional permite através da topologia de rede e do histórico de interrupções determinar a MLE do sistema em avaliação e assim mensurar os indicadores de continuidade desse sistema, o que é muito importante, pois é necessário avaliar a redução desses indicadores quando instalados os equipamentos de manobra telecomandados propostos.

E por fim, com a possibilidade de cálculo de fluxo de potência e dos indicadores de continuidade, a ferramenta computacional realiza a alocação dos equipamentos telecomandados estabelecendo uma priorização dos diversos pontos possíveis de instalação de acordo com os ganhos obtidos, baseado na metodologia descrita no Capítulo 5

6.1. Alocação dos Equipamentos Telecomandados

Em concordância com o proposto no Capítulo 5, a primeira definição a ser considerada além do objetivo da alocação dos equipamentos telecomandados é a de estabelecer a abrangência do estudo, ou seja, definir se a avaliação será realizada somente para um alimentador ou para uma determinada região.

Para essa avaliação foi escolhido o alimentador Cidade Industrial (CIN) 03 localizado na área metropolitana da concessão da empresa AES Sul, que alimenta

uma região de alta densidade de carga, alto faturamento e com alta densidade de consumidores residências, comerciais e industriais, mas que apresenta poucos recursos operacionais em situações de contingências, que nestes casos depende muito da disponibilidade de equipes de manutenção na região para não deteriorar seus indicadores de continuidade. A topologia da rede distribuição do alimentador CIN-03 é exemplificada no Anexo B, e de maneira simplificada pode ser visualizada na Figura 6.1.

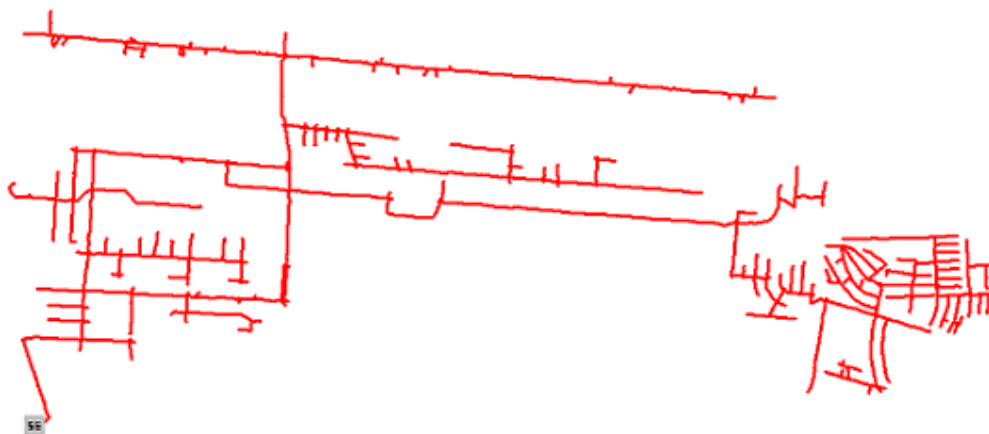


Figura 6.1 – Alimentador CIN-03 que será avaliado.

Definido o escopo da avaliação, baseado na estratégia de operação descrita no Capítulo 5 para instalação de equipamentos telecomandados, ou seja, que esses dispositivos sejam instalados em pares escolhendo um ponto NF em conjunto com um ponto NA. Para isso, será necessário considerar também os alimentadores adjacentes ao alimentador CIN-03 que fazem interligação com esse, pois durante a utilização da metodologia será necessário testar a viabilidade de utilização do par de equipamentos NF-NA, verificando se o alimentador adjacente suporta uma possível transferência da carga existente a jusante da chave NF do alimentador CIN-03 testada. A viabilidade dessa transferência é baseada na não violação das restrições operacionais descritas no Capítulo 5, em resumo, um nível de tensão mínimo de 90% e um carregamento máximo de 110%.

Para o exemplo em análise os alimentadores adjacentes são os alimentadores CIN-09 e CIN-10, cujas topologias são apresentadas abaixo.

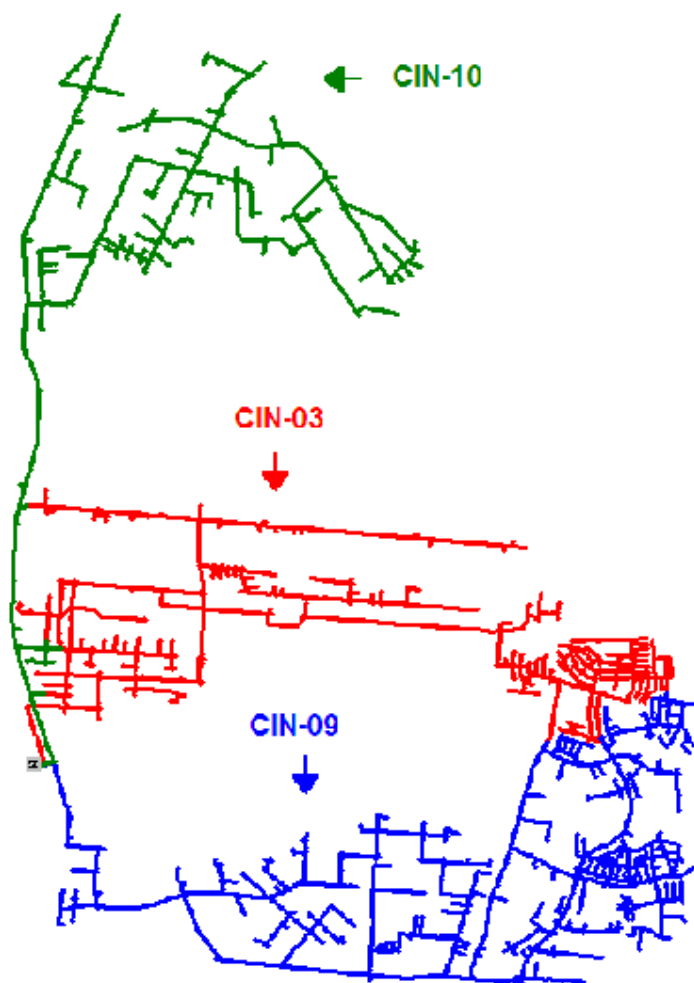


Figura 6.2 –Alimentador CIN-03 e adjacentes CIN-09 e CIN-10.

Os alimentadores adjacentes também possuem características parecidas com o alimentador CIN-03, pois possuem uma alta densidade de carga e clientes. Esses alimentadores possuem as características expostas no quadro a seguir. Pela quantidade de clientes e demanda máxima, verifica-se que trata de alimentadores com alto impacto financeiro e social para a companhia de energia elétrica.

AL	Vn (kV)	L (km)	Clientes	Dem. Máx. (MVA)	Capacitores (MVar)	Carreg. (A)	Carreg. (%)	V mín (kV)
CIN - 03	23,10	33,72	6.236	7,05	1,80	176,45	46,20	22,64
CIN - 09	23,10	40,63	10.568	8,00	1,20	199,98	39,20	22,38
CIN - 10	23,10	24,95	9.266	9,18	0,60	229,98	45,10	22,31

Quadro 6.1 – Resumo dos alimentadores avaliados.

Definida a configuração que será analisada, é possível aplicar o algoritmo de alocação de chaves telecomandadas proposto que irá determinar os locais NF e NA onde será possível alocar esses dispositivos.

Para avaliar o impacto de cada par de equipamentos telecomandados é indispensável medir seu ganho através da redução nos indicadores de continuidade do alimentador CIN-03. Para mensurar esse ganho é necessário possuir um histórico das interrupções do alimentador, para esse exemplo é utilizado o histórico de interrupções do alimentador CIN-03 do ano de 2009, sendo expostas parcialmente suas interrupções no Anexo C.

Importante destacar que nesta análise não são consideradas as interrupções provenientes da baixa tensão, normalmente associadas aos transformadores de distribuição e ao ramal do serviço do consumidor (interrompendo apenas um cliente), tal exclusão é necessária porque nesse trabalho é avaliada a redução nos indicadores de continuidade resultantes da instalação de equipamentos de manobra telecomandados, que terão ação somente em defeitos ocorridos na média tensão. Desta forma, genericamente as falhas estarão associadas ao alimentador, quando o defeito faz atuar a proteção do alimentador, ou as chaves quando o defeito promove a atuação de religadores, chaves repetidoras ou chaves fusíveis.

Definida as premissas para avaliar a alocação de chaves telecomandadas, para o exemplo o algoritmo proposto como resposta o seguinte resultado:

Chave NF	Chave NA	Redução DEC (horas)	Redução FEC (Quantidade)	ENS Evitada (kWh)
CAN-1068	CAN-275	0,0031	0,0000	16.495
CAN-1068	CAN-99	0,0031	0,0000	16.495
CAN-1089	CAN-245	0,0456	0,0000	377.443
CAN-1089	CAN-241	0,0456	0,0000	377.443
CAN-1089	CAN-1528	0,0456	0,0000	377.443
CAN-1097	CAN-216	0,0021	0,0000	0
CAN-1098	CAN-275	0,0092	0,0000	68.585
CAN-1148	CAN-245	0,0757	0,0027	369.376
CAN-1148	CAN-241	0,0757	0,0027	369.376
CAN-1148	CAN-1528	0,0757	0,0027	369.376
CAN-1544	CAN-275	0,0120	0,0000	83.085
CAN-210	CAN-275	0,0139	0,0000	76.027
CAN-291	CAN-275	0,0065	0,0000	36.348
CAN-291	CAN-99	0,0065	0,0000	36.348
CAN-391	CAN-275	0,0075	0,0000	54.637
CAN-412	CAN-245	0,0672	0,0000	317.461
CAN-412	CAN-241	0,0672	0,0000	317.461
CAN-412	CAN-1528	0,0672	0,0000	317.461
CAN-432	CAN-275	0,0001	0,0000	0
CAN-432	CAN-99	0,0001	0,0000	0
CAN-480	CAN-245	0,0469	0,0000	217.031
CAN-480	CAN-241	0,0469	0,0000	217.031
CAN-480	CAN-1528	0,0469	0,0000	217.031
CAN-534	CAN-245	0,0094	0,0000	47.424

Quadro 6.2 – Resultado da análise para instalação de pares de equipamentos telecomandados.

Observa-se que além da relação de pares de equipamentos telecomandados possíveis de serem instalados, também é apresentado o ganho que cada par de equipamentos causa para o sistema.

Importante destacar que no cálculo de indicadores de continuidade DEC e FEC é realizado sob a base de consumidores da empresa, ou seja, 1.100.000 (um milhão e cem mil) consumidores. Adotar essa base de clientes é importante, pois a execução de um plano de investimentos que determine a instalação de equipamentos telecomandados associado aos custos envolvidos deve sempre medir o ganho global para a empresa que decidir investir nesse tipo de solução. Já no cálculo do indicador ENS considera-se o tempo evitado nas interrupções e a demanda do trecho avaliado.

Como pode se observar, um mesmo ponto NF pode ter pares formados com diversos pontos NA, indicando a disponibilidade de alterar a possibilidade de transferência de carga desse ponto NF para diversos outros trechos. Porém na avaliação da instalação de equipamentos telecomandados, na mensuração dos ganhos das características avaliadas a escolha do ponto NA que fará par com o ponto NF não é significativa desde que haja capacidade de receber o montante de carga do ponto NF. É por isso que pares da lista de resposta anterior que possuam

em comum o mesmo ponto NF, possuam também valores de ganhos iguais em todos os critérios.

Desta maneira, nessa análise são suprimidos os pares equivalentes, ou seja, são mantidos apenas os pares com pontos NF distintos. A escolha de qual par excluir nesse exemplo será pela ordem de resposta do algoritmo, porém na prática é utilizado o ponto NA que não necessita de adequações físicas para instalação desse equipamento, minimizando os custos da solução. Assim sendo, a lista de resposta reduzida permanece:

Chave NF	Chave NA	Redução DEC (horas)	Redução FEC (Quantidade)	ENS Evitada (kWh)
CAN-1068	CAN-275	0,0031	0,0000	16.495
CAN-1089	CAN-245	0,0456	0,0000	377.443
CAN-1097	CAN-216	0,0021	0,0000	0
CAN-1098	CAN-275	0,0092	0,0000	68.585
CAN-1148	CAN-245	0,0757	0,0027	369.376
CAN-1544	CAN-275	0,0120	0,0000	83.085
CAN-210	CAN-275	0,0139	0,0000	76.027
CAN-291	CAN-275	0,0065	0,0000	36.348
CAN-391	CAN-275	0,0075	0,0000	54.637
CAN-412	CAN-245	0,0672	0,0000	317.461
CAN-432	CAN-275	0,0001	0,0000	0
CAN-480	CAN-245	0,0469	0,0000	217.031
CAN-534	CAN-245	0,0094	0,0000	47.424

Quadro 6.3 –Lista resumida dos resultado da análise.

6.2. Análise Multicriterial com o AHP

A resposta obtida com o algoritmo de alocação de equipamentos telecomandados permite determinar todos os pontos possíveis de instalação desses equipamentos, quantificando até os seus benefícios. Porém num problema real, os recursos são limitados, não permitindo a instalação de fato de todos os pares de pontos avaliados como exequíveis, desta maneira a escolha de um ou alguns pontos específicos para instalação dos equipamentos telecomandados é crucial.

O objetivo é realizar uma priorização de todos os pontos avaliados e baseado no ganho que cada par apresenta determinar os pontos mais importantes. Para essa análise multicriterial é utilizado a metodologia AHP apresentada no Capítulo 4.

A primeira etapa é definir qual a importância de cada critério na avaliação geral, para determinar qual a solução ótima do problema e que apresenta o resultado mais harmônico entre todos os critérios. Para definir esse nível de

importância, a proposta é obter avaliação de especialistas com relação ao problema de forma a darem uma resposta a esse problema.

Para esse exemplo, foram consultados quatro especialistas:

1. Operação: Engenheiro da área de operação do sistema de distribuição da empresa, que possui como objetivo a redução nos tempos de atendimento aos clientes;

2. Proteção: Engenheiro da área de proteção da empresa, que tem como meta uma minimização dos transtornos causados por interrupções nos sistemas de distribuição;

3. Planejamento: Engenheiro da área de planejamento da empresa, que possui como objetivo obter dos ativos os melhores retornos financeiros possíveis, minimizando multas e receitas perdidas;

4. Regional: Engenheiro alocado na regional da empresa, que possui como meta minimizar os danos que uma interrupção representa para a companhia como um todo.

A avaliação de cada especialista deverá compreender os seguintes passos:

- I. Responder questionário proposto para comparação de critérios;
- II. Montagem da matriz de comparação;
- III. Determinar autovetor e autovalor;
- IV. Determinar os pesos de cada critério;
- V. Verificar consistência das informações prestadas pelo especialista.

Desta maneira, para esse exemplo inicia-se a análise dos pesos de cada critério pelo especialista da operação, que é chamado de especialista 1.

Inicialmente o especialista 1 preenche o questionário proposto pela metodologia apresentando como resposta:

OBJETIVO	Avaliação da necessidade de instalação de chaves telecomandadas		
AVALIADOR	ENG. OPERAÇÃO		
	CRITÉRIO 1	COMPARAÇÃO	CRITÉRIO 2
DEC	3	< >	FEC
DEC	7	< >	ENS
FEC	3	< >	ENS

Figura 6.3 – Questionário de análise dos pesos do especialista 1.

Posteriormente é constituída a matriz de comparação e automaticamente é calculado o autovetor e os autovalores, utilizando a plataforma do software Excel através da utilização da linguagem *visual basic for application* (VBA) conforme:

Matriz	DEC	FEC	ENS	Autovetor	AutoValor
DEC	1	3	7	0.654	3.121212
FEC	0.333333	1	3	0.258	2.868132
ENS	0.142857	0.333333	1	0.088	3.043011

Figura 6.4 – Matriz de comparação, autovetor e autovalores 1.

Desta os pesos de cada critério para o especialista 1 são:

Critério	Peso
DEC	0.654
FEC	0.258
ENS	0.088

Figura 6.5 – Pesos de cada critério.

Por fim, verifica-se a consistência das informações prestadas, conforme Capítulo 4:

IC	0.061
RC	0.117
Análise	INCONSISTENTE

Figura 6.6 – Análise da consistência das informações.

Desta forma, verifica-se que as informações prestadas pelo especialista 1, não são consistentes e, portanto a priori apresentam relativa fragilidade para serem consideradas, já que seu valor de RC final violou o máximo de 5% permitido, conforme definido no Capítulo 4.

OBJETIVO	Avaliação da necessidade de instalação de chaves telecomandadas		
AVALIADOR	ENG. PROTEÇÃO		
	CRITÉRIO 1	COMPARAÇÃO	CRITÉRIO 2
DEC	3	< [] >	FEC
DEC	8	< [] >	ENS
FEC	3	< [] >	ENS

Figura 6.7 – Questionário de análise dos pesos do especialista 2.

Formando a matriz de comparação e automaticamente determinando o autovetor e os autovalores:

Matriz	DEC	FEC	ENS	Autovetor	AutoValor
DEC	1	3	8	0.674	3.055556
FEC	0.333333	1	3	0.244	2.932692
ENS	0.125	0.333333	1	0.082	3.019048

Figura 6.8 –Matriz de comparação, autovetor e autovalores 2.

Desta forma, os pesos de cada critério para o especialista 2 são:

Critério	Peso
DEC	0.674
FEC	0.244
ENS	0.082

Figura 6.9 –Matriz de comparação, autovetor e autovalores 2.

Determinando se a consistência das informações prestadas:

IC	0.028
RC	0.053
Análise	INCONSISTENTE

Figura 6.10 – Análise da consistência das informações 2.

Desta forma, verifica-se que as informações prestadas pelo especialista 2 também não são consistente, pois seu valor de RC final violou o máximo de 5% permitido.

Realiza-se a análise da avaliação do especialista 3 iniciando com o preenchimento do questionário proposto, permanecendo:

OBJETIVO	Avaliação da necessidade de instalação de chaves telecomandadas		
AVALIADOR	ENG. PLANEJAMENTO		
	CRITÉRIO 1	COMPARAÇÃO	CRITÉRIO 2
DEC	3	< [] >	FEC
DEC	3	< [] >	ENS
FEC	1	< [] >	ENS 1

Figura 6.11 –Questionário de análise dos pesos do especialista 3.

Completando a matriz de comparação e automaticamente determinando o autovetor e os autovalores:

Matriz	DEC	FEC	ENS	Autovetor	AutoValor
DEC	1	3	3	0.600	3
FEC	0.333333	1	1	0.200	3
ENS	0.333333	1	1	0.200	3

Figura 6.12 – Matriz de comparação, autovetor e autovalores 3.

Desta forma, os pesos de cada critério para o especialista 3 são:

Critério	Peso
DEC	0.600
FEC	0.200
ENS	0.200

Figura 6.13 – Pesos de cada critério 3.

Verificando a consistência das informações:

IC	0.000
RC	0.000
Análise	CONSISTENTE

Figura 6.14 – Análise da consistência das informações 3.

Desta forma, conclui-se que as informações do especialista 3 são consistentes, pois seu RC não violou o máximo de 5% permitido. Portanto, tais avaliações poderão ser consideradas na avaliação multicriterial.

Por fim, é avaliado a opinião do especialista 4 através do preenchimento do questionário proposto.

OBJETIVO	Avaliação da necessidade de instalação de chaves telecomandadas	
AVALIADOR	ENG. REGIONAL	
	CRITÉRIO 1	CRITÉRIO 2
DEC	5	FEC
DEC	9	ENS
FEC	2	ENS

Figura 6.15 – Questionário de análise dos pesos do especialista 4.

Posteriormente é preenchida a matriz de comparação e automaticamente determinando o autovetor e os autovalores:

Matriz	DEC	FEC	ENS	Autovetor	AutoValor
DEC	1	5	9	0.757	3.033333
FEC	0.2	1	2	0.162	2.944444
ENS	0.111111	0.5	1	0.081	3.027586

Figura 6.16 – Matriz de comparação, autovetor e autovalores 4.

Desta forma, os pesos de cada critério para o especialista 4 são:

Critério	Peso
DEC	0.757
FEC	0.162
ENS	0.081

Figura 6.17 – Pesos de cada critério 4.

Verificando a consistência das informações:

IC	0.017
RC	0.032
Análise	CONSISTENTE

Figura 6.18 – Análise da consistência das informações 4.

Desta forma, as informações do especialista 4 são consistentes, pois seu RC não violou o máximo de 5% permitido.

Assim têm-se quatro opiniões de especialistas com interesses diversos sobre o problema proposto, sendo que duas opiniões apresentaram inconsistência e duas se apresentaram como consistentes. Diante disto, adota-se a opinião de algum dos especialistas que apresentaram consistências, de ambos ou de todos os que participaram. Para tanto o ideal é adotar a metodologia que permita integralizar todas as opiniões dos especialistas em uma avaliação apenas, porém antes disso é necessário avaliar se os especialistas possuem opiniões em torno da mesma perspectiva, ou seja, realizar uma avaliação da concordância dos pesos finais da análise de cada especialista conforme:

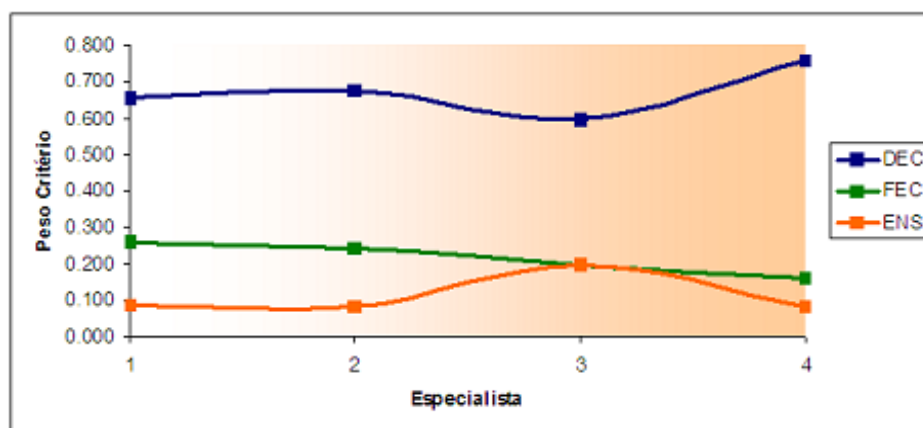


Figura 6.19 – Avaliação da opinião de todos os especialistas.

Assim verificando que não há nenhuma divergência significativa entre a avaliação de todos os especialistas, ou seja, que todos os critérios são avaliados harmonicamente e em uma proporção equivalente por cada um dos especialistas, é possível estabelecer a integralização da opinião de todos os especialistas de acordo com o definido no Capítulo 4

Para efetuar tal processo conforme descrito no Capítulo 4, a integralização ocorre através da formação de uma nova matriz de comparação, sendo que cada

elemento é composto pelo produtório dos elementos das matrizes de estimativa dos especialistas. Desta forma, para o exemplo a matriz de comparação integralizada resulta em um novo autovetor e novos autovalores conforme:

Matriz	DEC	FEC	ENS	Autovetor	AutoValor
DEC	1	3.408658	4.87973	0.664	3.017691
FEC	0.293371	1	1.565085	0.204	2.962863
ENS	0.204929	0.638943	1	0.132	3.022837

Figura 6.20 – Matriz de comparação integralizada e seu autovetor e autovalores.

Definido o autovetor da matriz integralizada, os pesos finais de todos os critérios são:

Critério	Peso
DEC	0.664
FEC	0.204
ENS	0.132

Figura 6.21 – Pesos finais de cada critério.

Porém, antes de determinar os pesos de cada critério como válidos é necessário verificar a consistência das informações:

IC	0.011
RC	0.022
Análise	CONSISTENTE

Figura 6.22 – Análise da consistência final das informações.

Por fim, verifica-se que as informações integralizadas são consistentes, pois seu RC ficou abaixo do valor máximo de 5%, apresentado um valor de apenas 2,2%.

Determinado os pesos de cada critério, é necessário integralizar todas as informações conforme o Capítulo 5, com o intuito de determinar um índice final para cada solução e assim promover uma priorização destas soluções.

Critério	Máximo
Redução DEC	0.0757
Redução FEC	0.0027
ENS Evitado	377,443.0000

Figura 6.23 – Valores máximos de cada critério.

Em posse dos máximos de cada critério é possível proceder a normalização dos valores obtendo como resposta:

Chave NF	Chave NA	Redução DEC (horas)	Redução FEC (Quantidade)	ENS Evitada (kWh)
CAN-1068	CAN-275	0,0410	0,0000	0,0437
CAN-1089	CAN-245	0,6024	0,0000	1,0000
CAN-1097	CAN-216	0,0277	0,0000	0,0000
CAN-1098	CAN-275	0,1215	0,0000	0,1817
CAN-1148	CAN-245	1,0000	1,0000	0,9786
CAN-1544	CAN-275	0,1585	0,0000	0,2201
CAN-210	CAN-275	0,1836	0,0000	0,2014
CAN-291	CAN-275	0,0859	0,0000	0,0963
CAN-391	CAN-275	0,0991	0,0000	0,1448
CAN-412	CAN-245	0,8877	0,0000	0,8411
CAN-432	CAN-275	0,0013	0,0000	0,0000
CAN-480	CAN-245	0,6196	0,0000	0,5750
CAN-534	CAN-245	0,1242	0,0000	0,1256

Quadro 6.4 – Soluções com critérios normalizados.

Com os pesos definidos, podem-se ponderar cada critério de acordo com seu nível de importância, obtendo-se novos valores para cada um destes:

Chave NF	Chave NA	Redução DEC (horas)	Redução FEC (Quantidade)	ENS Evitada (kWh)
CAN-1068	CAN-275	0,0272	0,0000	0,0058
CAN-1089	CAN-245	0,3999	0,0000	0,1318
CAN-1097	CAN-216	0,0184	0,0000	0,0000
CAN-1098	CAN-275	0,0807	0,0000	0,0239
CAN-1148	CAN-245	0,6639	0,2043	0,1290
CAN-1544	CAN-275	0,1052	0,0000	0,0290
CAN-210	CAN-275	0,1219	0,0000	0,0265
CAN-291	CAN-275	0,0570	0,0000	0,0127
CAN-391	CAN-275	0,0658	0,0000	0,0191
CAN-412	CAN-245	0,5894	0,0000	0,1108
CAN-432	CAN-275	0,0009	0,0000	0,0000
CAN-480	CAN-245	0,4113	0,0000	0,0758
CAN-534	CAN-245	0,0824	0,0000	0,0166

Quadro 6.5 – Soluções com critérios normalizados e com pesos.

Desta maneira, para verificar o índice geral de cada solução basta proceder com o somatório de seus critérios normalizados e com os respectivos pesos. Por fim, quanto maior o índice final mais prioritária é a solução, desta maneira é possível estabelecer um ranking de todas as soluções:

Prioridade	Chave NF	Chave NA	Índice Final
1	CAN-1068	CAN-275	0.9972
2	CAN-1089	CAN-245	0.7002
3	CAN-1097	CAN-216	0.5317
4	CAN-1098	CAN-275	0.4871
5	CAN-1148	CAN-245	0.1485
6	CAN-1544	CAN-275	0.1343
7	CAN-210	CAN-275	0.1046
8	CAN-291	CAN-275	0.0990
9	CAN-391	CAN-275	0.0849
10	CAN-412	CAN-245	0.0697
11	CAN-432	CAN-275	0.0329
12	CAN-480	CAN-245	0.0184
13	CAN-534	CAN-245	0.0009

Quadro 6.6 – Priorização de todas as soluções de acordo com seu índice final.

Desta maneira, aplicando a metodologia proposta obtém-se uma hierarquia final de todas as soluções possíveis e pode-se selecionar aquela que apresentar os melhores resultados de acordo com os critérios e níveis de importâncias determinados. Selecionado a melhor solução e confirmado a exequibilidade técnica de ser implementada, a etapa seguinte para expandir o escopo de soluções seria realizar a mesma análise, porém considerando já instalado o novo par de equipamentos telecomandados e assim sucessivamente até o limite de recursos disponíveis da empresa ou até que os benefícios gerados pela instalação desses equipamentos comecem a ficar limitados ou inexistentes.

Baseado na metodologia proposta, essa avaliação foi realizada considerando toda a área de concessão da empresa AES Sul Distribuidora Gaúcha de Energia S.A, contemplando a análise de mais de 1.100.000 (um milhão e cem mil) consumidores, aproximadamente 350 alimentadores e em torno de e 70 subestações, com o intuito de obter uma reposta de todos os pontos possíveis de instalação de equipamentos telecomandados e mensurar o ganho que cada par de equipamentos representará para a empresa. Baseado na hierarquização final que a metodologia fornece, foi possível auxiliar a empresa na alocação e instalação de cerca de 200 equipamentos (100 pares de equipamentos) que já estão proporcionando resultados significativos nos seus indicadores de continuidade.

A opção de utilização pela empresa da metodologia proposta foi tomada em função da possibilidade de agregar interesses diversos num mesmo projeto, ou seja, a análise multicriterial utilizada através do AHP que permitiu qualificar a opinião dos especialistas foi essencial para determinar a metodologia como a melhor opção para a empresa que seria capaz de contemplar diversos interesses conflitantes, através da obtenção de análises de engenheiros da operação, proteção, planejamento e da regional.

Desta maneira, conclui-se que para problemas como o apresentado, a metodologia representa uma solução assertiva e harmônica, possibilitando uma resposta em consonância com todos os interesses envolvidos.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho foi proposta uma metodologia para alocação de equipamentos de manobra telecomandados, considerando a localização desses dispositivos a partir de uma análise multicriterial utilizando a metodologia AHP.

Com o desenvolvimento da metodologia de alocação, para restringir o campo de soluções possíveis e assim não haver uma explosão de combinações de pares de chaves, foi estabelecido no algoritmo a possibilidade de calcular o fluxo de potência e assim verificar a técnica de utilização dos equipamentos telecomandados, considerando as restrições de nível de tensão mínimo nas barras e carregamento máximo nos trechos. Assim, foi possível reduzir consideravelmente o campo de soluções na análise multicriterial, permitindo obter a solução em um tempo de processamento aceitável.

Além disso, o algoritmo desenvolvido permitiu calcular os principais indicadores de continuidade dos sistemas avaliados como DEC, FEC e ENS, podendo-se avaliar esses indicadores do sistema em regime permanente e também após cada par de equipamentos telecomandado instalado, permitindo assim mensurar a redução possível de se obter com dada solução proposta.

Adicionalmente, durante a análise multicriterial a metodologia proposta permitiu considerar a opinião de especialistas para o auxílio na tomada de decisão ou até integralizar a opinião de diversos especialistas em única resposta, permitindo assim priorizar as soluções possíveis encontradas em função de critérios pré-estabelecidos e de acordo com o nível de importância de critério, baseado na experiência desses especialistas.

Por fim, o resultado obtido na avaliação de alocação de equipamentos telecomandados no alimentador exemplo determina as soluções tecnicamente possíveis e que de alguma maneira resultam na minimização dos indicadores de continuidade avaliados. Usando a metodologia de análise multicriterial AHP e avaliando as respostas de cada solução para cada critério é possível priorizar todas as soluções em função do benefício que representam e assim verificar aquelas que trarão maiores benefícios para empresa considerando seus objetivos.

7.1. Contribuições

O autor acredita serem originais as seguintes contribuições:

- 1) Metodologia para alocação multicriterial de equipamentos telecomandados considerando o histórico de interrupções dos sistemas avaliados;
- 2) Algoritmo para verificar a disponibilidade técnica das manobras na utilização de equipamentos telecomandados propostos através do cálculo de fluxo de potência da topologia em operação sob contingências;
- 3) Análise da redução dos indicadores de continuidade, comparando a topologia existente e a topologia com a inserção dos equipamentos telecomandados propostos através da adequação da metodologia MLE ao problema proposto;
- 4) Análise multicriterial de todas as soluções possíveis através da aplicação do método AHP, considerando a opinião de especialistas da área;
- 5) Qualificação da opinião dos especialistas, permitindo desconsiderar qualquer avaliação que apresente respostas inconsistentes ou até a integralização das respostas de especialistas com o intuito de obter uma avaliação final;
- 6) Metodologia com resultados práticos e aplicado a um caso real.

7.2. Artigos Publicados

Artigos publicados em congressos e eventos nacionais e internacionais.

- 1) DAZA, E. F. B.; ABAIDE, A. R.; CANHA, L. N.; BERNARDON, D.P.; COMASSETTO, L.. Sistema de Alocação e Operação de chaves telecomandadas utilizando multicritérios. VI CIERTEC - Seminário

Internacional sobre Smart Grid em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. 2009.

- 2) DAZA, E. F. B.; ABAIDE, A. R.; CANHA; L. N.; BERNARDON, D.P.; COMASSETTO, L; SPERANDIO, M.; GARCIA, V. J. ; FERREIRA, CARDOSO JR., G.. Alocação Ótima de Chaves Telecomandadas nas Redes de Distribuição para Aumento da Confiabilidade dos Sistemas. VIII CBQEE – Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, Blumenau. 2009.

Artigos publicados em revistas internacionais

- 3) DAZA, E. F. B.; ABAIDE, A. R.; CANHA; L. N.; BERNARDON, D.P.; COMASSETTO, L.. Sistema de Alocação e Operação de chaves telecomandadas utilizando multicritérios. Revista CIER, Número 59. 2010.

Premiações recebidas em eventos internacionais

- 4) DAZA, E. F. B.; ABAIDE, A. R.; CANHA; L. N.; BERNARDON, D.P.; COMASSETTO, L.. Sistema de Alocação e Operação de chaves telecomandadas utilizando multicritérios. Melhor trabalho em toda América latina no VI CIERTEC - Seminário Internacional sobre Smart Grid em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. 2009.

7.3. Sugestões para Continuidade do Trabalho

Sugere-se para a continuidade e aperfeiçoamento do trabalho os seguintes itens:

- 1) Avaliar os resultados obtidos na redução dos indicadores de continuidade com a instalação dos equipamentos telecomandados em relação aos valores previstos inicialmente pela metodologia.

- 2) Realizar a análise da viabilidade econômica das soluções propostas, de maneira a determinar uma relação custo benefício e assim priorizar as soluções em função dessa relação ou agregar ao algoritmo uma função objetivo considerando os custos de cada solução;
- 3) Acrescentar na metodologia um algoritmo que valide a coordenação e seletividade dos equipamentos de proteção quando a topologia operar em contingências (reconfiguradas);
- 4) Avaliar a precisão da entrada de dados correspondente ao histórico de interrupções, modelando esses valores de modo a considerar somente as interrupções mais precisas;
- 5) Inserir novos critérios na análise.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abaide, A. R.; Desenvolvimento de Métodos e Algoritmos para Avaliação e Otimização da Confiabilidade em Redes de Distribuição; Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Maria, Brasil. 2005.

AES Sul Distribuidora Gaúcha de Energia S/A. Procedimentos Operacionais. 2008.

AES Sul Distribuidora Gaúcha de Energia S/A. Dados técnicos do Sistema Elétrico 2010. 2010.

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Resolução 024 – 20009.

Disponível em

< <http://www.aneel.gov.br/cedoc/res2000024.pdf>> Acesso em: 10 de agosto. 2010.

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Resolução 373 – 2009.

Operador Nacional do Sistema - ONS. Procedimentos de rede – Módulo 20.

Disponível em

<http://www.ons.org.br/download/procedimentos/modulos/Modulo_20/Subm%C3%B3dulo%2020.1_Rev_1.0.pdf> Acesso em: 10 de agosto. 2010

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL.PRODIST - Procedimentos da Distribuição, 2010. Disponível em

< <http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=82&idPerfil=2>> Acesso em: 10 de agosto. 2010.

Bernardon, D. P.; Desenvolvimento de Algoritmos e Sistema Computacional para Estimação de Estados em Redes de Distribuição, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Brasil. 2004.

Bernardon, D. P.; Novos Métodos para Reconfiguração das Redes de Distribuição a partir de Algoritmos de Tomadas de Decisão Multicriteriais; Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Maria, Brasil. 2007.

Bernardon, D.P.; Garcia, V.J.; Ferreira, A.S.Q.; Canha, L.N.; da Rosa Abaide, A. Distribution Network Reconfiguration Starting from Fuzzy Multicriteria Decision

Making Algorithms. Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference, 2009. CERMA '09. Pp 440-445.

Bernardon, D. P.; Garcia, V. J.; Ferreira, A. S. Q.; Canha, L. N.; Abaide, A. R.. Algoritmos de Tomada de Decisão Multicriterial Fuzzy para Reconfiguração das Redes de Distribuição. VIII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica – CBQEE. Blumenau, Brasil. 2009.

Canha, L. N. Metodologia para localização e dimensionamento de pequenas fontes de geração distribuída em redes de distribuição a partir de uma análise multicriterial. Tese Doutorado, Universidade Federal de Santa Maria, Brasil. 2004.

Carvalho, P.M.S.; Ferreira, L.A.F.M.; da Silva, A.J.C.; A decomposition approach to optimal remote controlled switch allocation in distribution systems; Power Delivery, IEEE Transactions on; Volume 20, Issue 2, Part 1, 2005, Pp. 1031-1036

Celli, G.; Pilo, F.; Optimal sectionalizing switches allocation in distribution networks; Power Delivery, IEEE Transactions on; Volume 14, Issue 3, 1999, Pp. 1167-1172

Comassetto, L.; Desenvolvimento de Algoritmos para Otimização da Confiabilidade de Redes de Distribuição; Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Brasil. 2004

da Silva, L.G.W.; Pereira, R.A.F.; Mantovani, J.R.S.; Optimized allocation of sectionalizing switches and control and protection devices for reliability indices improvement in distribution systems; Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2004 IEEE/PES; 2004; Pp 51-56

Daza, E. F. B.; Abaide, A. R.; Canha, L. N.; Bernardon, D. P.; Comassetto, L.; Sperandio, M.; Garcia, V. J. ; Ferreira, A. S. Q.; Cardoso Jr, G.. Alocação Ótima de Chaves Telecomandadas nas Redes de Distribuição para Aumento da Confiabilidade dos Sistemas. VIII CBQEE– Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, Blumenau. 2009.

Daza, E. F. B.; Abaide, A. R.; Canha, L. N.; Bernardon, D. P.; Comassetto, L.. Sistema de Alocação e Operação de chaves telecomandadas utilizando multicritérios. VI CIERTEC - Seminário Internacional sobre Smart Grid em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. 2009

de Almeida, C.I.; Lambert-Torres, G.; Barros Neto, M.C.; Cunha de Andrade, G.C.; Valerio de Moraes, C.H. An application of PHAP in power system planning.

Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2008
IEEE/PES. Pp 1-6.

De Tuglie, E.; La Scala, M.; Patrono, G.; Pugliese, P.; Torelli, F.; An optimal strategy for switching devices allocation in radial distribution network; AFRICON, 2004. 7th AFRICON Conference in Africa; Volume 2, 2004, Pp 683-689.

Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica – DNAEE. Portaria nº 244, de 28 de junho de 1996. Diário Oficial.

Ekel, P. Y.; Terra, L. D. B.; Junges, M. F. D. Methods of Multicriteria Decision Making in Fuzzy Environment and Their Applications to Transmission and Distribution Problems. Transmission and Distribution Conference, 1999 IEEE. Volume 2. 1999. Pp 765-770.

Ekel, P.Ya.; Terra, L.D.B.; Fontes, C.C.; Souza, J.P.; Popov, V.A. Talking into account power system reaction in problems of multicriteria optimizing network configuration in distribution systems. Electric Power Engineering, 1999. PowerTech Budapest 99. International Conference on. Pp 67.

Kagan, N.; Oliveira, C.C.B.; Robba, E.J. Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.

Moldrik, P.; Gurecky, J.; Paszek, L. Usage of multi-criteria analysis and supportive software for optimum location of the modern devices within electrical distribution networks. Electrical Power Quality and Utilisation, 2009. EPQU 2009. 10th International Conference on. Pp 1-6.

Saaty, T. L. The Analytic Hierarchy Process. N. York, USA: McGraw-Hill, 1980.

Saaty, T. L.; Decision Making for Leaders: The Analytic Hierarchy Process for Decisions in a Complex World. 2nd ed. Pittsburgh, Pa.: University of Pittsburgh, 1990

Saaty, T.L.. Highlights and Critical Points in the Theory and Application of the Analytic Hierarchy Process, European Journal of Operational Research 52, 426-447. 1994.

Saaty, T.L.. Decision-making with the AHP: Why is the principal eigenvector necessary. European Journal of Operational Research. Vol. 145, pg. 85-91, 2003.

Saaty, T.L.; Ozdemir, M. S.. Why the Magic Number Seven Plus or Minus Two. *Mathematical and Computer Modelling*. Vol. 38. Pg 233-244, 2003.

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.; 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.

Sperandio, M.; Planejamento de Automação de Sistemas de Manobra em Redes de Distribuição; Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil. 2008.

Stojkov, M.; Nikolovski, S.; Mikulicic, V. Estimation of electrical energy not supplied in reliability analysis of distribution networks. *Electrotechnical Conference, MELECON 2004. Proceedings of the 12th IEEE Mediterranean*. V. 3, Pp. 967-970.

Tsao, T.; Chang, H. C. Composite reliability evaluation model for different types of distribution systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, V. 18, N. 2, 2003, pp. 924-930.

Villasanti, A.; Baran, B.; Gardel, P.; Multiobjective allocation of remotely controlled switches in an electric distribution power system; *Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2008 IEEE/PES; 2008* ; Pp 1-7.

Yang Wenyu; Liu Jian; Yu Jianmin; Dong Haipeng; Song Meng; Optimal allocation of switches in distribution networks; *Intelligent Control and Automation, 2004. WCICA 2004. Fifth World Congress on; Volume 6, 2004*, Pp 5155-5159

Zadeh, L. A.; *Fuzzy Sets, Information and Control*. V.8, 1965.

ANEXOS

ANEXO A – Representação da Topologia das Redes de Distribuição

Ao longo dos anos recentes, muitos tópicos de investigações e metodologias distintas foram gerados ao redor da viabilidade de projetos de GD, tanto para aspectos técnicos, econômicos, e regulatórios sobre as mais distintas premissas.

Para realizar qualquer análise em sistemas de distribuição de energia elétrica a representação adequada de sua topologia é requisito básico para que essas análises obtenham respostas reais e eficientes, pois são essenciais para avaliação do sistema proteção, do cálculo de curto-circuito, cálculo do fluxo de potência, avaliação das reconfigurações de topologia possíveis e entre outros.

Em geral, em sistemas de energia é usual a representação da topologia através de matrizes. Porém tais matrizes normalmente apresentam dimensões muito grandes e com muitos elementos iguais a zeros exigindo assim a utilização de uma grande massa de memória em processamentos computacionais, não sendo assim adequadas as simulações de sistemas de distribuição que apresentam um número de barras muito elevado. Desta maneira a metodologia mais adequada para esse trabalho é a representação da topologia de rede utilizada tipicamente para redes de distribuição radiais, onde são consideradas apenas as informações sobre as ligações de rede que de fato existem, dispensando assim a utilização de matrizes e apresentando resultados mais eficientes para análises em sistemas de distribuição de energia conforme descrito por Bernardon (2005).

Segundo Bernardon, em sistemas de distribuição é usual a utilização da denominação “nó” para identificar os pontos que interligam dois elementos na topologia na rede de distribuição ou ainda definem o início ou fim de um elemento, sendo também usual a utilização da denominação “ramo” para quaisquer elementos localizados entre um nó inicial e um nó final. Desta forma, a representação da topologia de rede parte da necessidade de construção de dois conjuntos principais, o conjunto contendo informações dos nós e o conjunto contendo informações dos ramos. Dado que a construção dos conjuntos deve possuir uma seqüência elétrica correta, faz-se sempre necessário que o nó e ramo inicial seja os mais próximos da fonte, normalmente a subestação.

Na construção do conjunto dos nós indicam-se as seguintes características:

α_n - nível de informação sobre o nó dentro do conjunto nó;

β_n - nível de informação sobre o ramo que alimenta o nó considerado.

Já para o conjunto dos ramos indicam-se as seguintes características:

α_r - nível de informação sobre o ramo dentro do conjunto ramo;

β_r - nível de informação sobre o ramo que alimenta o ramo considerado.

Sendo:

$$\alpha_n = n + 1 \quad (\text{A.1})$$

onde:

- n - Índice do nó

E também:

$$\alpha_r = n + 1 \quad (\text{A.2})$$

onde:

- n - Índice do nó

A característica α_n é utilizada para identificar os nós da rede dentro do conjunto de nós, já a característica α_r é utilizada para identificar a ordem dos ramos da rede dentro do conjunto de ramos.

Já a característica β_r assume o valor da característica α_r do ramo que está à montante do ramo considerado.

$$\beta_r = \alpha_{r-1} \quad (\text{A.3})$$

Baseado nessa metodologia através da Figura A.1 e dos Quadros A.1 e A.2 exemplifica-se a utilização desta com mais clareza.

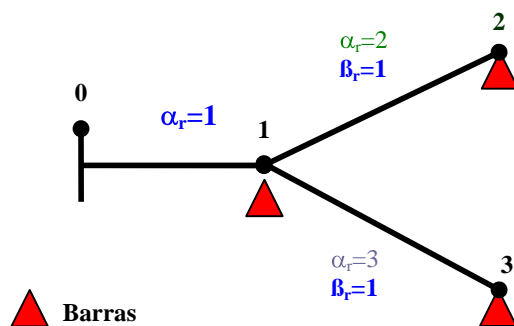


Figura A.1: Topologia de rede com a representação das características α_r e β_r .

Baseado na Figura A.1 é possível determinar o conjunto dos ramos dessa topologia:

Nó Inicial	Nó Final	Característica α_r	Característica β_r
0	1	1	-
1	2	2	1
1	3	3	1

Quadro A.1 - Conjunto dos ramos para a topologia apresentada.

Sendo a característica α_r utilizada somente para identificar a ordem dos ramos da topologia (ordem crescente e numérica). Da mesma forma a característica β_r assume o valor do parâmetro α_r do ramo que está à montante deste.

A partir do conjunto de ramos é estabelecido o conjunto de nós:

Nó Inicial	Nó Final	Característica α_n	Característica β_n
0	1	1	-
1	2	2	1
1	3	3	1

Quadro A.2 - Conjunto dos nós para a topologia apresentada.

Onde é possível observar que o β_n assume o valor da característica α_r do ramo que tem o nó final igual ao nó considerado, conforme:

$$\beta_n = \alpha_r \quad (\text{A.4})$$

Desta forma, a mesma topologia de rede de distribuição definida na Figura A.1 pode ser representada pelos conjuntos de ramos e nós definidos anteriormente podendo ser representada conforme a Figura A.2.

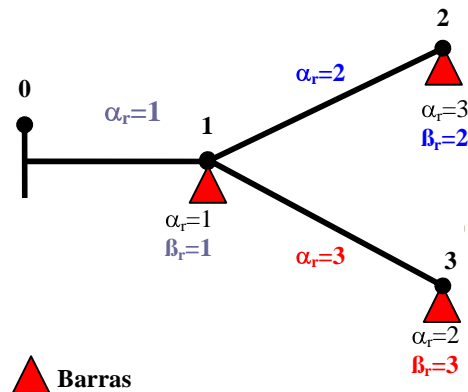


Figura A.2: Representação das características α_n e β_n da topologia de rede de distribuição apresentada.

Destacando que para realizar essa representação através das características β_r e β_n é utilizada essa metodologia de forma muito simples, pois para determiná-los é necessário somente identificar o trecho que fornece energia para o ramo e o nó analisados, respectivamente.

A utilização desse tipo de representação apresenta como vantagem a possibilidade de construção dos conjuntos de nós e do conjunto de ramos de forma única e em parcelas e após definidos as características β_r e β_n não é necessário recalculá-las, o que torna o método bastante útil. Pois inevitavelmente uma análise irá requerer o acréscimo de novos trechos ou alimentadores agilizando assim o processamento dos dados da topologia de rede de distribuição sob avaliação.

Outra característica relevante do método de representação é que somente são consideradas as informações das ligações que existem realmente na topologia de rede sem a necessidade de criar uma matriz de dimensão n , para n barras, o que é uma grande vantagem já que sistemas de distribuição de energia elétrica possuem uma elevada quantidade de barras e deveriam operar com uma matriz de dimensão muito grande.

Adicionalmente é importante destacar que todos os elementos de sistema de distribuição deverão ser alocados ou no conjunto de ramos ou no conjunto de nós. Sendo que elementos conectados em um único nó como transformadores de distribuição, bancos de capacitores, fontes de geração e entre outros deverão ser representados no conjunto de nós. Já elementos em série com a rede de distribuição como os próprios trechos de rede de distribuição, equipamentos de manobra e proteção, transformadores elevadores ou rebaixadores de distribuição, reguladores de tensão, capacitores série e entre outros deverão ser representados no conjunto de ramos.

ANEXO B – Topologia da rede analisada – CIN - 03

I. Resumo da quantidade dos principais elementos da rede analisada

Elemento	Quantidade
Barras	1.760
Trechos	1.762
Carga (Transformadores)	186
Chaves	87
Capacitores	3

II. Entrada de dados Barras – Modelo exemplificado

Barra	Posição X	Posição Y
750415	7724638	10090627
750416	7724961	10090611
750417	7725384	10090583
750418	7725717	10090565
750419	7726113	10090552
750420	7726235	10090545
750421	7726481	10090537
750422	7726236	10090617
750423	7726187	10090239
750424	7726482	10090537
750425	7726248	10090986
750426	7726203	10089868
750427	7726202	10090254
750428	7726281	10091203
750429	7726452	10091205
750430	7726153	10091216
750431	7726276	10091370
750432	7726453	10091205
750433	7726163	10091226
750434	7726283	10091761
750435	7726310	10091967
750436	7726298	10091746
750437	7726580	10091963
750438	7726164	10091970
750439	7726305	10092129
750440	7727003	10091939
750441	7726174	10091980
750442	7726353	10092441
750443	7727013	10091949
750444	7726348	10092677
750445	7726469	10093104
750446	7726496	10093530
750447	7726526	10093746
750448	7726329	10093750
750449	7726747	10093706
750450	7726518	10093905
750451	7725987	10093782
750452	7727077	10093713
750453	7726534	10094185
750454	7725979	10093783
750455	7727087	10093713
750456	7726519	10094455
...
...
752171	7759991	10096395
752172	7724402	10085773
752173	7724398	10085769
752174	7724010	10085617

III. Entrada de dados Trechos – Modelo exemplificado

Trecho	Barra 1	Barra 2	Cabo Tipo	Comprimento (m)
750518	750416	750415	3#336,4CA	32
750519	750417	750416	3#336,4CA	42
750520	750418	750417	3#336,4CA	33
750521	750419	750418	3#336,4CA	39
750522	750420	750419	3#336,4CA	12
750523	750420	750421	3#300CA	24
750524	750420	750422	3#4/0CA	7
750525	750423	750420	3#4/0CA	30
750526	750421	750424	3#300CA	1
750527	750422	750425	3#4/0CA	36
750528	750426	750423	3#4/0CA	37
750529	750423	750427	3#6CC	2
750530	750425	750428	3#4/0CA	21
750531	750428	750429	3#4CA	17
750532	750428	750430	3#4CA	12
750533	750428	750431	3#4/0CA	16
750534	750429	750432	3#4CA	1
750535	750430	750433	3#4CA	1
750536	750431	750434	3#4/0CA	39
750537	750434	750435	3#4/0CA	20
750538	750434	750436	3#6CC	2
750539	750435	750437	3#2CA	27
750540	750435	750438	3#2CA	14
750541	750435	750439	3#4/0CA	16
750542	750437	750440	3#2CA	42
750543	750438	750441	3#4CA	1
750544	750439	750442	3#4/0CA	31
750545	750440	750443	3#4CA	1
750546	750442	750444	3#4/0CAA	23
750547	750444	750445	3#4/0CA	44
750548	750445	750446	3#4/0CA	42
750549	750446	750447	3#4/0CA	21
750550	750447	750448	3#4CA	19
750551	750447	750449	3#4CA	22
750552	750447	750450	3#4/0CA	15
750553	750448	750451	3#4CA	34
750554	750449	750452	3#4CA	33
750555	750450	750453	3#4/0CA	28
750556	750451	750454	3#4CA	1
750557	750452	750455	3#4CA	1
750558	750453	750456	3#4/0CA	27
750559	750456	750457	3#4/0CA	32
750560	750456	750458	3#6CC	2
750561	750457	750459	3#4/0CA	36
750562	750459	750460	3#4/0CA	38
750563	750460	750461	3#4/0CA	22
750564	750461	750462	3#3/0CA	35
750565	750462	750463	3#3/0CA	25
750566	750463	750464	3#3/0CA	37
...
...
752189	752170	752168	3#2CA	26
752190	752171	752170	3#2CA	1
752191	752172	752173	3#150CACP	1
752192	752174	752172	3#150CACP	6

IV. Entrada de datos Carga – Modelo exemplificado

Carga ID	Barra ID	Código	P (kW)	Q (kVAr)
116061	750427	CAN - 663	31.113	13.254
116062	750436	CAN - 661	36.057	15.36
116063	750458	CAN - 1813	17.949	7.647
116064	750477	CAN - 420	32.22	13.725
116065	750501	CAN - 426	9.939	4.233
116066	750506	CAN - 432	30.324	12.918
116067	750514	CAN - 2764	70.218	29.79
116068	750526	CAN - 1305	13.896	5.919
116069	750529	CAN - 2074	208.527	89.367
116070	750533	CAN - 1634	22.677	9.66
116071	750536	CAN - 97867	0	0
116072	750541	CAN - 2242	87.24	36.882
116073	750546	CAN - 2081	219.165	98.589
116074	750566	CAN - 8065	72.345	65.961
116075	750569	CAN - 339	0.219	0.093
116076	750581	CAN - 2231	37.593	16.314
116077	750604	CAN - 979	1.728	0.735
116078	750605	CAN - 2079	294.348	129.798
116079	750610	CAN - 2078	0	0
116080	750613	CAN - 2476	0	0
116081	750618	CAN - 2082	124.833	53.196
116082	750642	CAN - 3028	8.874	3.78
116083	750647	CAN - 2093	100.716	42.555
116084	750656	CAN - 411	26.589	11.328
116085	750661	CAN - 412	39.678	16.902
116086	750687	CAN - 415	36.072	15.366
116087	750694	CAN - 664	37.563	16.002
116088	750697	CAN - 1644	20.052	15.186
116089	750721	CAN - 421	24.882	10.599
116090	750724	CAN - 3107	12.438	5.298
116091	750725	CAN - 2694	6.264	4.773
116092	750747	CAN - 418	51.423	21.906
116093	750750	CAN - 1374	1.032	0.438
116094	750756	CAN - 2220	302.646	4025.931
116095	750761	CAN - 8023	6.396	4.755
116096	750767	CAN - 2098	21.987	9.219
116097	750772	CAN - 2750	2.133	1.641
116098	750784	CAN - 413	22.704	9.672
116099	750795	CAN - 837	38.361	16.341
116100	750799	CAN - 2993	0.117	0.051
116101	750814	CAN - 414	20.817	8.868
116102	750823	CAN - 1544	10.359	4.413
116103	750833	CAN - 1801	22.713	9.675
116104	750839	CAN - 3056	24.237	10.326
116105	750858	CAN - 416	55.287	23.553
116106	750871	CAN - 1338	14.379	6.126
116107	750873	CAN - 1310	12.825	5.463
116108	750877	CAN - 2629	13.8	10.257
116109	750882	CAN - 430	26.01	11.082
...
...
116243	752150	CAN - 3172	0	0
116244	752157	CAN - 2975	16.512	7.035
116245	752158	CAN - 2977	0	0
116246	752169	CAN - 2976	6.375	2.715

V. Entrada de dados Chaves – Modelo exemplificado

Chave_ID	Equipamento	Tipo_Chave	Trecho_ID	Capacidade
63155	CIN - 03	Disjuntor	750434	400
63152	CAN - 1644	Chave Faca B	750431	200
63153	CAN - 298	Chave Faca B	750432	200
63154	CAN - 1100	Chave Faca B	750433	200
63156	CAN - 432	Chave Faca B	750435	400
63157	CAN - 1068	Chave Faca B	750436	200
63158	CAN - 97867	Chave Fusível B	750437	100
63159	CAN - 2242	Chave Fusível B	750438	100
63160	CAN - 2082	Chave Fusível B	750439	100
63161	CAN - 2082A	Chave Faca B	750440	100
63162	CAN - 1093	Chave Fusível B	750441	22.5
63163	CAN - 291	Chave Faca B	750442	200
63164	CAN - 2694	Chave Fusível B	750443	100
63165	CAN - 1094	Chave Fusível B	750444	22.5
63166	CAN - 2098	Chave Fusível B	750445	100
63167	CAN - 8023	Chave Fusível B	750446	100
63168	CAN - 2750	Chave Fusível B	750447	100
63169	CAN - 220	Chave Fusível B	750448	97.5
63170	CAN - 1095	Chave Fusível B	750449	22.5
63171	CAN - 439	Chave Faca B	750450	400
63172	CAN - 214	Chave Fusível B	750451	22.5
63173	CAN - 2629	Chave Fusível	750452	100
63174	CAN - 1088	Chave Fusível B	750453	22.5
63175	CAN - 1089	Chave Fusível B	750454	60
63176	CAN - 1544	Chave Faca B	750455	200
63177	CAN - 1643	Chave Faca B	750456	200
63178	CAN - 1097	Chave Faca B	750457	200
63179	CAN - 2600	Chave Fusível B	750458	100
63180	CAN - 210	Chave Faca B	750459	200
63181	CAN - 297	Chave Fusível	750460	60
63182	CAN - 1098	Chave Faca B	750461	400
63183	CAN - 391	Chave Fusível B	750462	97.5
63184	CAN - 2727	Chave Fusível B	750463	100
63185	CAN - 2483	Chave Fusível B	750464	100
63186	CAN - 2080	Chave Fusível B	750465	100
63187	CAN - 2621	Chave Fusível B	750466	100
63188	CAN - 2140A	Chave Fusível B	750467	100
63189	CAN - 2710	Chave Fusível B	750468	100
63190	CAN - 8009	Chave Fusível B	750469	100
63191	CAN - 2140	Chave Fusível B	750470	100
63192	CAN - 2390	Chave Fusível B	750471	100
63193	CAN - 2081	Chave Fusível B	750472	50
63194	CAN - 438	Chave Faca B	750473	200
63195	CAN - 349	Chave Fusível B	750474	22.5
63196	CAN - 347	Chave Fusível B	750475	22.5
63197	CAN - 348	Chave Fusível B	750476	22.5
63198	CAN - 346	Chave Fusível B	750477	22.5
63199	CAN - 345	Chave Fusível B	750478	22.5
63200	CAN - 343	Chave Fusível B	750479	22.5
...
...
63235	CAN - 534	Chave Faca B	750514	200
63236	CAN - 1136	Chave Fusível B	750515	150
63237	CAN - 8048	Chave Fusível B	750516	15
63238	CAN - 2711	Chave Fusível B	750517	100

VI. Entrada de dados Capacitor – Modelo completo

Capacitor_ID	Barra_ID	Código	Q (kVAr)	Capacidade
703	750437	CAN - 5040	600	400
704	750636	CAN - 5044	600	200
705	751763	CAN - 5048	600	200

ANEXO C – Interrupções no sistema analisado

Instalação	Equipamento	Hora Início	Hora Deslocamento	Hora Causa	Hora Fim	Duração (minutos)
CAN - 493	Chave	1/1/09 1:06	03:25:22	03:48:29	04:09:05	183.08
CAN - 1136	Chave	23/1/09 13:15	13:23:35	13:42:55	14:14:05	59.08
CAN - 1136	Chave	29/1/09 22:42	23:05:00	23:46:35	02:10:08	207.27
CAN - 1136	Chave	11/2/09 23:40	00:08:20	00:17:41	00:31:05	50.75
CAN - 1136	Chave	17/2/09 18:24	18:48:39	19:12:04	19:24:07	60.12
CIN - 03	Alimentador	18/2/09 9:19	09:30:25	09:39:40	11:54:00	155.00
CAN - 1136	Chave	18/2/09 7:35	08:04:00	08:04:00	11:25:00	229.70
CAN - 1136	Chave	18/2/09 22:06	22:23:53	22:37:31	22:46:00	39.52
CAN - 297	Chave	15/3/09 9:03	09:56:27	10:19:29	10:30:08	87.13
CAN - 501	Chave	20/3/09 12:31	12:41:35	12:50:48	13:08:07	37.02
CAN - 1136	Chave	4/4/09 21:38	21:59:00	22:16:09	22:37:06	58.15
CAN - 1136	Chave	7/4/09 6:19	08:53:00	07:53:45	10:24:00	245.00
CAN - 439	Chave	19/5/09 17:27	17:34:28	18:04:45	22:15:00	288.00
CAN - 1136	Chave	7/7/09 8:00	08:26:49	08:35:09	09:09:06	69.10
CAN - 501	Chave	7/7/09 8:02	08:59:11	09:12:19	09:30:08	88.13
CAN - 1136	Chave	19/7/09 6:06	07:19:58	07:56:59	08:05:07	119.12
CAN - 501	Chave	22/7/09 7:29	07:36:11	08:03:45	08:28:05	59.08
CAN - 1136	Chave	22/7/09 14:42	14:58:00	15:13:19	16:00:06	78.10
CAN - 1089	Chave	23/7/09 1:44	04:15:00	03:13:34	07:00:00	316.00
CAN - 1089	Chave	23/7/09 6:24	07:33:21	07:52:52	09:11:00	166.10
CIN - 03	Alimentador	23/7/09 9:08	09:08:00	09:08:00	10:59:00	111.00
CAN - 1136	Chave	23/7/09 9:46	10:11:25	10:23:00	10:38:07	52.12
CAN - 214	Chave	27/7/09 12:55	13:18:02	13:23:03	14:10:05	75.08
CAN - 493	Chave	3/8/09 6:25	07:46:40	08:08:01	08:36:06	131.10
CIN - 03	Alimentador	9/8/09 21:23	21:33:00	21:50:00	22:13:00	50.00
CIN - 03	Alimentador	9/8/09 22:36	23:30:00	22:50:00	02:02:00	206.00
CIN - 03	Alimentador	10/8/09 2:46	03:02:00	03:35:00	04:28:00	102.00
CAN - 439	Chave	10/8/09 2:46	02:46:00	03:30:00	04:50:00	124.00
CAN - 480	Chave	13/8/09 15:14	15:15:00	15:15:00	16:42:00	88.00
CIN - 03	Alimentador	19/8/09 4:39	05:03:00	05:35:00	06:35:00	116.00
CAN - 1136	Chave	28/8/09 20:57	21:05:27	21:14:12	22:15:09	78.15
CAN - 1136	Chave	4/9/09 14:32	15:21:00	15:48:08	16:11:00	98.07
CAN - 1088	Chave	7/9/09 17:10	20:44:00	17:31:10	05:18:00	727.25
CAN - 1089	Chave	8/9/09 6:43	09:02:00	09:06:14	10:09:00	205.68
CAN - 216	Chave	11/9/09 9:53	11:25:02	10:44:32	12:21:00	148.00
CAN - 1136	Chave	25/9/09 10:20	10:28:02	10:50:05	11:22:07	62.12
CAN - 1088	Chave	5/10/09 17:21	15:20:00	20:03:00	18:18:00	1497.00
CAN - 1097	Chave	5/10/09 18:23	22:34:00	22:36:00	20:22:00	1559.00
CAN - 1136	Chave	5/10/09 17:21	23:21:48	23:22:33	23:36:02	374.13
CAN - 1136	Chave	9/10/09 16:55	17:05:47	17:13:31	18:19:05	83.55
CAN - 1136	Chave	31/10/09 15:48	15:56:00	16:05:00	16:56:00	67.87
CAN - 1136	Chave	3/11/09 15:55	16:13:04	16:27:53	17:50:04	115.07
CAN - 1136	Chave	19/11/09 13:32	17:24:00	18:00:00	18:16:00	283.67
CAN - 1136	Chave	19/11/09 19:19	23:17:25	23:36:18	23:45:02	266.03
CAN - 214	Chave	19/11/09 18:04	21:00:00	21:09:21	21:15:00	191.00
CAN - 501	Chave	20/11/09 15:49	22:04:00	22:29:00	23:01:00	431.17
CAN - 1969	Chave	23/11/09 13:47	18:17:37	19:06:00	19:13:00	325.98
CAN - 1136	Chave	28/11/09 9:51	10:34:17	10:54:07	11:15:06	83.13
CAN - 501	Chave	2/12/09 15:17	15:48:04	16:07:19	16:15:00	57.47
CAN - 1136	Chave	4/12/09 18:42	18:54:01	19:22:15	20:17:05	94.72
CAN - 1136	Chave	7/12/09 7:23	07:26:59	07:53:28	08:32:36	69.60
CIN - 03	Alimentador	19/11/09 13:03	13:03:00	13:03:00	13:10:00	7.00
CAN - 1136	Chave	12/12/09 12:35	14:31:00	14:55:43	16:38:00	242.30
CAN - 1969	Chave	26/12/09 9:16	09:21:00	09:40:37	09:52:07	36.12
CAN - 1969	Chave	29/12/09 10:45	12:29:56	12:55:04	13:15:03	150.05