

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

**HIERARQUIZAÇÃO DE ALIMENTADORES PARA
FINS DE MANUTENÇÃO UTILIZANDO ANÁLISE
MULTICRITERIAL**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Renato Ferret

Santa Maria, RS, Brasil.

2012

HIERARQUIZAÇÃO DE ALIMENTADORES PARA FINS DE MANUTENÇÃO UTILIZANDO ANÁLISE MULTICRITERIAL

Renato Ferret

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 Dr^ª Alzenira da Rosa Abaide

Santa Maria, RS, Brasil.

2012

**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

**HIERARQUIZAÇÃO DE ALIMENTADORES PARA FINS DE
MANUTENÇÃO UTILIZANDO ANÁLISE MULTICRITERIAL**

elaborada por
Renato Ferret

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

COMISSÃO EXAMINADORA:

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

Daniel Pinheiro Bernardon, Dr. (UNIPAMPA)

Tiago Bandeira Marchesan, Dr. (UFSM)

Santa Maria, dia 20 de janeiro de 2012.

Dedicatória

Este trabalho é dedicado em memória
de um grande homem: meu pai, Arlindo
Ferret, que me mostrou o caminho.

AGRADECIMENTOS

Meu primeiro obrigado devo aos Professores Somchai Anuj e João Paulo Minussi pela recomendação.

A minha mãe, que estando longe ou perto sempre se mantivera 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, pelo apoio e profissionalismo.

Gostaria de agradecer em especial a Professora Alzenira da Rosa Abaide, orientadora, pelo incentivo e paciência ao longo do percurso e, principalmente, pela exigência amiga e constante para que o trabalho chegasse a termo.

Aos colegas e amigos da UFSM e CEEMA, pelo auxílio durante o trabalho.

Aos gestores da Empresa COPREL, por terem me aberto às portas da empresa para a realização do trabalho.

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

“Se um homem tem um talento e não tem capacidade de usá-lo, ele fracassou. Se ele tem um talento e usa somente a metade deste, ele fracassou parcialmente. Mas se ele tem um talento e de certa forma aprende a usá-lo em sua totalidade, ele triunfou gloriosamente e obteve nesse triunfo uma satisfação que poucos homens conhecerão.”

Thomas Wolfe.

RESUMO

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

HIERARQUIZAÇÃO DE ALIMENTADORES PARA FINS DE MANUTENÇÃO UTILIZANDO ANÁLISE MULTICRITERIAL

AUTOR: RENATO FERRET

ORIENTADORA: ALZENIRA DA ROSA ABAIDE

Santa Maria, 20 de janeiro de 2012.

O sistema de distribuição das concessionárias passou a enfrentar novos desafios com a regulamentação do setor elétrico brasileiro através da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). A agência, através de resoluções e normativas passou a fiscalizar o serviço oferecido pelas concessionárias aos consumidores. Diante desta fiscalização o sistema de distribuição passou a ser monitorado e como é o maior responsável pela interrupção do fornecimento de energia aos consumidores, tornou-se importante que fossem feitos investimentos bem direcionados buscando um serviço confiável. Interrupções constantes e de grande duração passou a ser penalizada pela ANEEL. Considerando as penalidades impostas, as concessionárias necessitam investir na manutenção preventiva do seu sistema de distribuição, surgindo então um problema de difícil solução: o problema do planejamento operacional, na maioria dos casos, tem como objetivo minimizar o somatório das despesas. A programação e realização das atividades de manutenção é um dos principais problemas envolvidos. Onde realizar a manutenção investindo os limitados recursos disponíveis de forma a melhorar a qualidade da energia fornecida ao cliente é a proposta deste trabalho. Será indicado um ranking mostrando em quais alimentadores dentre os estudados é mais recomendado realizar ações de manutenção, considerando critérios de natureza quantitativa. Trata-se de um problema de auxílio à tomada de decisão envolvendo análise multicriterial. Para a solução será utilizado o método AHP, *Analytic Hierarchy Process*, proposto por Thomas L. Saaty. Na aplicação do método serão utilizados os dados de quatro alimentadores de distribuição rural, pertencente à Cooperativa de Energia e Desenvolvimento Rural COPREL LTDA (COPREL), todos de uma mesma subestação, localizada no município de Cruz Alta no Rio Grande do Sul. O algoritmo proposto permite levar em conta várias características operacionais do sistema e fornece a possibilidade de utilizar a opinião dos especialistas da empresa. Estes especialistas são os próprios funcionários, técnicos e engenheiros responsáveis e que têm experiência suficiente para contribuir no processo de solução dos problemas. Este trabalho explora duas maneiras de obtenção do ranking dos alimentadores. A primeira explorada é o cálculo exato através dos autovalores e autos vetores das matrizes e logo a seguir é apresentado o método aproximado, permitindo uma comparação entre as duas possibilidades de cálculo. A metodologia escolhida apresenta os alimentadores ordenados por importância de acordo com os critérios indicados pela empresa. Estes alimentadores listados de acordo com a ordem de importância são onde deve prioritariamente ocorrer às atividades de manutenção. Destaca-se que o ranking obtido prioriza os alimentadores onde deverão ser realizadas as atividades de manutenção.

Palavras-chave: AHP. Atividade de manutenção. Decisão multicriterial. Hierarquia. Qualidade de energia.

ABSTRACT

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

HIERARQUIZAÇÃO OF FEEDERS FOR PURPOSES OF MAINTENANCE USING ANALYSIS MULTICRITERIAL

AUTHOR: RENATO FERRET

ADVISOR: ALZENIRA DA ROSA ABAIDE

Santa Maria, January 20, 2012.

The system of distribution of the power utility started to face new challenges with the regulations of the Brazilian electric sector through the National Electric Energy Agency (ANEEL). The agency, through resolutions and normative started to supervise the service offered by power utility to consumers. In face of this supervision of the distribution system has to be monitored and how is the biggest responsible for interruption of supply of energy to consumers, it has become important for investment as well directed searching for a reliable service. Constant interruptions and of great duration has passed to be penalized by ANEEL. Whereas the penalties imposed, utilities need to invest in preventive maintenance of its distribution system, appearing then a problem of difficult solution: the problem of operational planning, which in most cases, aims to minimize the sum of the costs. The programming and implementation of maintenance activities is one of the main issues involved. Where to perform the maintenance investing the limited resources available so as to improve the quality of energy supplied to the customer is the proposal of this work. Will be given a ranking showing which feeders among the studied are most recommended to perform maintenance actions, considering criteria for quantitative nature. It is a problem of aiding decision-making involving multicriterial analysis. For the solution will be used the AHP, Analytic Hierarchy Process, proposed by Thomas I. Saaty. In application of the method you will use the data of four rural distribution feeders, in the Energy Cooperative and Rural Development COPREL LTDA (COPREL); all of the same substation, located in the municipality of Cruz Alta, Rio Grande do Sul. The proposed algorithm allows taking into account several operational characteristics of the system and provides the possibility of using the expert opinion of the company. These experts are the own officials, technicians and engineers responsible and who have sufficient experience to contribute in the process of solving problems. This work explores two ways of obtaining the ranking of feeders. The first exploited is the exact calculation of eigenvalues of matrices and vectors and autos logo the following is the approximate method, allowing a comparison between the two possibilities for calculation. The chosen methodology exposes the feeders ordered by importance according to the criteria set by the company. These feeders listed according to the order of importance are where should primarily occur on maintenance activities. It is noteworthy that the ranking obtained prioritizes the feeders where should be carried out the maintenance activities.

Keywords: AHP. Maintenance activity. Multicriterial decision. Hierarchy. Power quality.

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS.

AHP: Analytic Hierarchy Process

AL: Alimentador

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

Ch: Chave

COPREL: Cooperativa de Energia e Desenvolvimento Rural COPREL LTDA

DEC: Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora

DIC: Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora

DMIC: Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora

DJ: Disjuntor

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

ONS: Operador Nacional do Sistema

RC: Razão da Consistência

SDMT: Sistemas de Distribuição de Média Tensão

SAIDI: System Average Interruption Duration Index

SAIFI: System Average Interruption Frequency Index

SE: Subestação

V: Tensão

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Área de atuação da COPREL.....	20
Figura 2.2 – Alimentadores SE Cruz Alta.....	21
Figura 4.1 – Matriz - exemplo de comparações par a par ou de julgamento.....	48
Figura 4.2 – Exemplo de questionário para o AHP.....	49
Figura 4.3 – Matriz consistente	52
Figura 4.4 – Representação da matriz consistente primeira linha	54
Figura 5.1 – Etapas do processo de avaliação para tomada de decisão.....	58
Figura 5.2 – Modelo hierárquico de estruturação adaptado ao estudo de caso	60
Figura 5.3 – Árvore de decisão.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Comparativo da aplicabilidade dos métodos multicriteriais	26
Tabela 4.1- Escala numérica Saaty: representação numérica comparação paritária	48
Tabela 4.2 - Índice de inconsistência aleatória para até dez alternativas	51
Tabela 5.1 - Matriz de julgamento dos critérios a luz do objetivo geral	63
Tabela 5.2 - Matriz de julgamento das alternativas a luz do critério DEC.....	64
Tabela 5.3 - Matriz de julgamento das alternativas a luz do critério FEC	64
Tabela 5.4 - Matriz de julgamento das alternativas a luz do critério carregamento.....	64
Tabela 5.5 - Matriz de julgamento das alternativas a luz do critério Nº Clientes	64
Tabela 5.6 - Matriz de julgamento das alternativas a luz do critério perdas distrib.....	65
Tabela 5.7 - Matriz de julgamento das alternativas a luz do critério Descargas Atmosf	65
Tabela 5.8 - Matriz de julgamento das alternativas a luz do critério Nível de Tensão	65
Tabela 5.9 - Índices e Razões de Consist. matrizes de julg. dos AL's a luz de critério	66
Tabela 5.10 - Prioridades Globais dos AL's	67
Tabela 5.11 - Matriz das Prioridades Médias Locais (PML's) e Globais (PG)	67
Tabela 5.12 - Matriz de comparação entre critérios	70
Tabela 5.13 - Vetores Prioridades dos Critérios.....	70
Tabela 5.14 - Matriz de comparação entre alternativas em relação ao DEC.....	71
Tabela 5.15 - Matriz de comparação entre alternativas em relação ao FEC	71
Tabela 5.16 - Matriz de comparação entre alternativas em relação ao Carregamento.....	71
Tabela 5.17 - Matriz de comparação entre alternativas em relação ao Nº Clientes	72
Tabela 5.18 - Matriz de comparação entre alternativas em relação às Perdas de Distrib	72
Tabela 5.19 - Matriz de comparação entre alternativas em relação a Descargas Atmosf	72
Tabela 5.20 - Matriz de comparação entre alternativas em relação ao Nível de Tensão	72
Tabela 5.21 - Vetor prioridade média local solução simplificada.....	73
Tabela 5.22 - Vetor Prioridade média local solução simplificada.....	73
Tabela 5.23 - Vetor Prioridade média local solução simplificada.....	74
Tabela 5.24 - Vetor Prioridade média local solução simplificada.....	74
Tabela 5.25 - Vetor Prioridade média local solução simplificada.....	74
Tabela 5.26 - Vetor Prioridade média local solução simplificada.....	75
Tabela 5.27 - Vetor Prioridade média local solução simplificada.....	75
Tabela 5.28 - Prioridades Finais Simplificadas	75

Tabela 5.29 - Comparações entre Critérios.....	76
Tabela 5.30 - Comparações entre Alternativas em relação ao critério DEC	77
Tabela 5.31 - Comparações entre Alternativas em relação ao critério FEC	77
Tabela 5.32 - Comparações entre Alternativas em relação ao critério Carregamento.....	77
Tabela 5.33 - Comparações entre Alternativas em relação ao critério N° de clientes.....	78
Tabela 5.34 - Comparações entre Alternativas em relação ao critério perdas de distrib.....	78
Tabela 5.35 - Comparações entre Alternativas em relação ao critério descarga atmosf.....	79
Tabela 5.36 - Comparações entre Alternativas em relação ao critério nível de tensão	79
Tabela 5.37 - Comparação das prioridades Globais	79
Tabela 5.38 - Causas de desligamentos	81
Tabela 5.39 - Critérios x Ações de Manutenção preventiva.....	82

LISTA DE APÊNDICES

APÊNDICE A – Exemplo de Cálculos das Soluções.....	97
APÊNDICE B - Dado técnicos dos alimentadores.....	128

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 REVISÕES BIBLIOGRÁFICAS	19
2.1 Informações da permissionária COPREL	19
2.1.1 Áreas de atuação da COPREL.....	19
2.1.2 Área piloto do trabalho	20
2.2 Principais fatores que influenciaram decisivamente na manutenção dos sistemas de distribuição das concessionárias.	21
2.2.1 Privatizações do Sistema Elétrico Brasileiro.....	22
2.3 Métodos de Análise Multicriterial.....	22
2.3.1 Conceitos básicos em tomada de decisão	23
2.3.2 Considerações sobre os métodos multicritério	23
2.3.3 Principais Métodos de Análise Multicriterial.....	25
3 MANUTENÇÕES DE SISTEMAS ELÉTRICOS	29
3.1 Gestões estratégicas da manutenção	29
3.1.1 Nível componente:.....	30
3.3 O planejamento da manutenção nas empresas de distribuição	36
3.3.1 À continuidade do serviço prestado de energia elétrica	37
3.4 Hierarquizações das Redes de Distribuição nas empresas	39
3.4.1 Desempenho operativo	39
3.4.2 Importância da rede.	40
3.4.3 Condições mecânicas e elétricas.....	42
3.5 Manutenções de alimentadores	42
4 A METODOLOGIA PARA A PRIORIZAÇÃO MULTICRITERIAL USANDO O MÉTODO AHP	45
4.1 Metodologias proposta para priorização de alimentadores	45
4.2 O método AHP.....	46
4.2.2 Solução exata usando autovalores e autovetores.....	51
4.2.3 Solução Aproximada	54
4.2.4 Limitações do método AHP	56
5 APLICAÇÕES DO MÉTODO AHP NA HIERARQUIZAÇÃO DE ALIMENTADORES DE REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	57

5.1 Etapas do procedimento proposto para aplicação do método AHP.....	57
5.2 Estudos de caso.....	59
5.2.1 Modelagem do problema	59
5.2.2 Execução da Solução Exata	60
5.2.3 Execução da Solução Aproximada	69
5.2.4 Análise da comparação entre as soluções exata e aproximada:	76
5.2.5 Análise e avaliação dos critérios e soluções	80
5.2.6 Implementação	81
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	85
6.1 Contribuições.....	87
6.2 Artigos Publicados ou Aceitos.....	87
6.3 Sugestões para Trabalhos Futuros	88
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89
APÊNDICES.....	95

1 INTRODUÇÃO

Atualmente a energia elétrica tem papel fundamental para a vida da sociedade, tornando-se um insumo essencial para competitividade econômica mundial e ainda para elevar o padrão de vida de sua população. O sistema elétrico de potência surge da necessidade constante de fornecimento de energia elétrica. Esse sistema é responsável pela geração, transmissão e distribuição da energia e pertencente a empresas estatais, privadas e permissionárias regionais.

Ao longo dos anos muitos foram os investimentos nas áreas de geração e transmissão, uma vez que qualquer falha afetava um número muito maior de consumidores do que uma falha na distribuição, o que acabou fazendo com que essas áreas tivessem um grande desenvolvimento em detrimento do sistema de distribuição.

Segundo estudos da área estima-se que cerca de 80% das falhas em sistemas de potência estão associadas a elementos pertencentes a sistemas de distribuição (TSAO; CHANG, 2003). Nos dias atuais, com a constante necessidade de se reduzir custos, aumentarem lucros e com o aumento da fiscalização do Agente Nacional de Energia Elétrica ANEEL (2011) sobre a qualidade da energia entregue ao consumidor, tem crescido significativamente a necessidade de investimentos e estudos no aprimoramento do sistema de distribuição de energia, surgindo um então um problema de difícil solução: onde investir os limitados recursos disponíveis para manutenção de forma a evitar a interrupção do fornecimento de energia, ou ainda para torná-lo mais breve possível.

O serviço de fornecimento de energia elétrica depende de vários fatores que são características do sistema. Esses fatores são, por exemplo, carregamento do alimentador, condições físicas da rede, percentual de seu limite térmico, consumidores prioritários, indicadores de continuidade (DEC – Duração Equivalente de interrupção por Unidade Consumidora e FEC – Frequência Equivalente de interrupção por unidade consumidora), índice de arborização entre outros ANEEL (2011). Esses fatores são afetados pelas interrupções causadas por falhas em equipamentos, ação de animais, mau tempo, árvores, falhas humanas, dentre outras diversas causas. Diante de tantos critérios e da grande quantidade de alimentadores de uma empresa de distribuição de energia elétrica, e levando-se em consideração a complexidade do sistema de distribuição, a priorização de alimentadores para manutenção de redes leva a uma análise multicriterial.

A proposta deste trabalho é aplicar uma ferramenta de apoio a tomada de decisão que permita além de usar as informações disponíveis nas empresas de distribuição de energia elétrica, também utilizar o conhecimento e a experiência dos especialistas da área. O método matemático que mais se aproxima da proposta é a metodologia AHP, *Analytic Hierarchy Process*, proposta inicialmente por Saaty (1980) que descreveu sua utilização para diversas áreas de conhecimento. Portanto, o objetivo deste trabalho é hierarquizar os alimentadores para manutenção de redes de sistemas de distribuição aplicando-se a metodologia AHP. Para a simulação do método foi usado o software Microsoft Office Excel e para a hierarquização dos alimentadores alguns objetivos específicos precisam ser alcançados:

a) identificar, junto aos especialistas da COPREL as variáveis quantitativas e qualitativas relevantes, referentes ao processo de priorização de alimentadores para manutenção de redes de sistemas de distribuição. Este trabalho delimita-se a uma modelagem com variáveis quantitativas de manutenção.

b) tratar as variáveis a fim de transformá-las em critérios de decisão (atribuição de notas e pesos) para a construção de um modelo de decisão multicriterial;

c) modelar as métricas quantitativas em planilhas para que os múltiplos critérios façam parte da hierarquização dos alimentadores e

d) avaliar a aplicabilidade do método proposto, no estudo de caso, na priorização dos alimentadores.

Com esse estudo, têm-se mais uma ferramenta, que integrada com outras já utilizadas na manutenção da distribuição, contribuirão para auxiliar no planejamento da manutenção de uma forma mais sistêmica na concessionária, deixando para trás o modelo exaurido, sem uma análise geral da confiabilidade do sistema.

Na avaliação da qualidade de desempenho das empresas de serviço público que atuam no setor elétrico são considerados três aspectos: continuidade, conformidade e atendimento comercial, com base em indicadores específicos como DEC, FEC entre outros, definidos na regulamentação do setor ANEEL (2011). A correta avaliação destes indicadores, bem como o impacto que eles têm em outros indicadores correlacionados, é importante para nortear a estratégia que cada empresa deve formular e para direcionar corretamente os investimentos em manutenção.

Neste trabalho, o autor preocupou-se a oferecer ao leitor uma modelagem prática e objetiva quanto à forma de hierarquização de alimentadores, pautando tanto pelas necessidades cotidianas e eventuais do ato de realizar manutenção nas redes de distribuição e sua orientação, como auxiliar no planejamento da manutenção direcionando corretamente os

investimentos. Para isso, buscaram-se no banco de dados da permissionária COPREL, fatores dos alimentadores do sistema de distribuição que afetam sua priorização, para execução da aplicação prática da metodologia.

A dissertação foi dividida em seis capítulos e, em cada um destes, serão apresentados os seguintes tópicos:

Capítulo 1, Introdução: Mostra-se a importância da energia elétrica para a vida da sociedade moderna e a consequente importância da manutenção no complexo sistema de energia elétrica das empresas que leva energia ao consumidor final. Baseado nesta complexidade surge a proposta de hierarquização dos alimentadores do sistema de distribuição através do método multicritério AHP.

Capítulo 2, Revisão Bibliográfica: Este capítulo apresenta algumas informações da permissionária COPREL, alguns dos principais fatores que influenciaram decisivamente na manutenção e por fim, considerações sobre os métodos de análise multicritério.

Capítulo 3, Manutenção dos Sistemas elétricos: Neste capítulo apresentam-se conceitos da gestão estratégica da manutenção, da manutenção de sistemas elétricos, do planejamento da manutenção nas empresas de distribuição e, concluindo com conceitos da hierarquização das redes de distribuição dessas empresas.

Capítulo 4, A metodologia para a priorização multicritério usando o método AHP: Esse capítulo mostra a metodologia utilizada pelo autor e os fundamentos, funcionamento da metodologia de análise e decisão multicritério AHP e ainda suas limitações.

Capítulo 5, Aplicações do método AHP na hierarquização de alimentadores de rede de distribuição de energia elétrica: é aplicada toda a metodologia para hierarquização dos alimentadores através de um exemplo prático, bem como sua análise e discussão.

Capítulo 6, Conclusão e Recomendações: O autor conclui a proposta do trabalho, ressalta as contribuições e sugere trabalhos futuros;

Apêndice A, apresenta-se exemplo de cálculo das soluções exata e aproximada;

Apêndice B, apresenta-se os dados técnicos dos alimentadores.

2 REVISÕES BIBLIOGRÁFICAS

Este capítulo apresenta algumas informações da permissionária COPREL, os principais fatores que influenciaram decisivamente na manutenção dos sistemas de distribuição das concessionárias como o Art. 6º da lei nº 8987 de 13/02/1995 e a privatização do sistema elétrico brasileiro.

Também, considerações sobre os métodos de análise multicriterial são abordadas em particular o AHP, utilizado na aplicação da hierarquização dos alimentadores.

2.1 Informações da permissionária COPREL

A antiga cooperativa de eletrificação rural foi fundada em 14 de janeiro de 1968, na cidade de Ibirubá, município do Estado do Rio Grande do Sul.

Conforme determinação da ANEEL, a atividade de distribuição de energia elétrica deve ser um único negócio, onde as atividades atípicas da COPREL foram desmembradas, surgindo assim, uma nova cooperativa. A partir daí, tem como seu principal objetivo o fornecimento adequado de energia elétrica, ou seja, na tensão (V) que o consumidor necessita, sem oscilações e com continuidade nesse fornecimento.

A nova COPREL, Cooperativa de Geração de Energia e Desenvolvimento foi criada na Assembléia Geral Extraordinária da cooperativa em 11 de agosto de 2006.

2.1.1 Áreas de atuação da COPREL

A área de atuação da COPREL está localizada ao norte do estado do Rio Grande do Sul, atendendo mais de 46.000 clientes, estando presente hoje em 72 municípios do estado.
Figura 2.1.



Figura 2.1 – Área de atuação COPREL - Fonte: COPREL (2010).

2.1.2 Área piloto do trabalho

Para a área piloto do trabalho foram considerados os alimentadores de distribuição da Subestação do município de Cruz Alta, RS pertencente à Cooperativa de Geração de Energia e Desenvolvimento COPREL LTDA – COPREL, localizada no município de Ibirubá / RS. São eles: ALS 9201; 9202; 9203 e 9204 todos de característica rural, radiais, constituído de um tronco principal que, partindo da subestação de distribuição, alimenta os diversos ramais de grande extensão linear e de baixa densidade de carga, nas quais o circuito toma direções distintas face às próprias características de distribuição da carga dificultando o estabelecimento de pontos de interligação, Figura 2.2, e inserido ao sistema de energia elétrico do estado do Rio Grande do Sul.

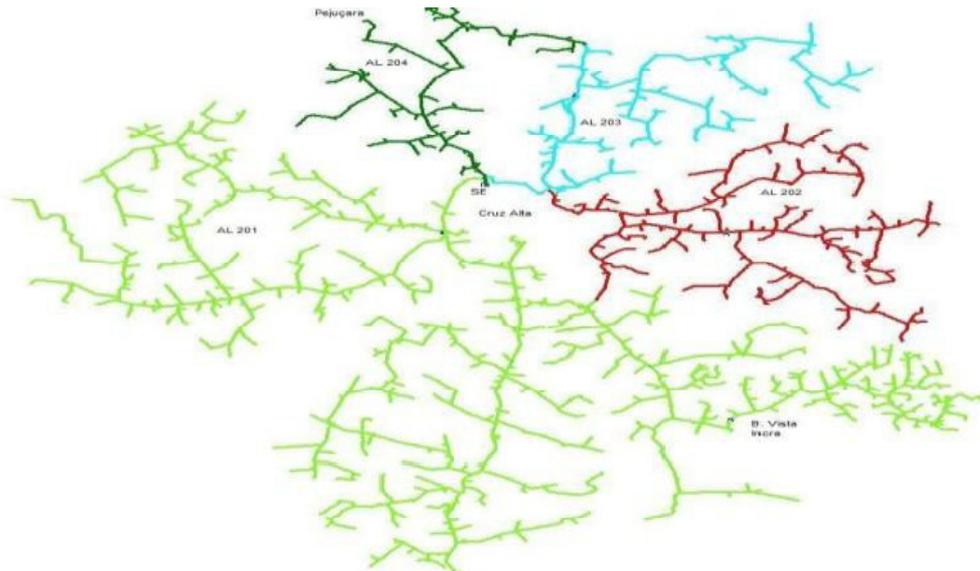


Figura 2.2 – Alimentadores SE Cruz Alta - Fonte: COPREL (2010)

2.2 Principais fatores que influenciaram decisivamente na manutenção dos sistemas de distribuição das concessionárias.

2.2.1 A lei n.º 8987 de 13/02/1995, que dispõe sobre o regime de concessão e permissão dos serviços públicos, em seu Art. 6º define que:

“Toda a concessão e permissão pressupõe a prestação de serviço adequado ao pleno atendimento dos usuários, conforme estabelecido nesta Lei, nas normas pertinentes e no respectivo contrato”. Define, ainda, no parágrafo primeiro, deste mesmo Art., serviço adequado como sendo “o que satisfaz as condições de regularidade, continuidade, eficiência, segurança, atualidade, generalidade, cortesia na sua prestação e modicidade das tarifas”.

As condições dessa lei são monitoradas através de indicadores de qualidade impostas pelo poder concedente, representado pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL.

O processo produtivo das empresas de energia elétrica é receber energia elétrica em alta tensão numa subestação, e distribuir essa energia numa tensão adequada aos clientes, além da comercialização deste produto e seus serviços de manutenção e operação. Os controles e serviços necessários de manutenção daí advindos fazem parte do trabalho.

2.2.2 Privatizações do Sistema Elétrico Brasileiro

Com a crise em que se encontrava o setor elétrico brasileiro até o início da década de 90, não restou outra alternativa senão a da privatização do setor, com a Lei n.º 8.631, de 04 de março de 1993. Logo em seguida, designada pelo Governo Federal, iniciou-se a regulamentação do setor através da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. A partir daí o cenário passou a ser outro, passa-se de um modelo regulado pelo estado, para um modelo de livre competição entre as empresas concessionárias de energia elétrica. Com a atribuição de fiscalização da qualidade dos serviços e produtos a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL passa a regular o setor. Esse processo de privatização desencadeou motivado pelos investimentos insuficientes, tarifas defasadas, obras paralisadas, concessões de distribuições vencidas e grande inadimplência setorial.

Com a reestruturação do setor elétrico nacional no fim da década de 90, separando os seguimentos de geração, transmissão e distribuição, tem-se um novo ambiente de concorrência entre os agentes. Em consequência desta nova situação onde os agentes são obrigados a cumprirem metas de eficiência e qualidade definidas na regulamentação do setor pela ANEEL, onde também são associados às penalidades que acarretam algumas consequências econômicas sobre a remuneração variável e tarifação aplicada às empresas, obrigando-as a disponibilizarem seus sistemas ao máximo.

2.3 Métodos de Análise Multicriterial

Na área de energia elétrica é freqüente a necessidade de tomada de decisão. Propondo-se indicar um ranking de alimentadores para auxílio na manutenção da distribuição, considerando critérios de natureza quantitativa, essa tomada de decisão envolve análise multicriterial.

Thomas L. Saaty e Niemira (2006) relacionam escolha com “a avaliação e priorização de cursos de ação alternativos” e previsão com “a avaliação de retornos futuros alternativos”. Escolha e previsão são componentes do que se chama de decisão.

2.3.1 Conceitos básicos em tomada de decisão

Alguns conceitos em toma de decisão são descritos abaixo:

Decisor ou tomador de decisão é o indivíduo ou grupo de indivíduos que, proporciona o juízo de valor final que poderá ser usado no momento de avaliar as alternativas disponíveis, com o objetivo de identificar a melhor escolha (GOMES, 2007).

Analista é a pessoa, ou equipe de trabalho, encarregada de modelar o problema e, fazer as recomendações relativas à seleção final, quando necessário. (GOMES; ARAYA; CARIGNANO, 2004).

Atributo são características que representam propriedades ou capacidades das alternativas para satisfazer a necessidades, embora em diferentes intensidades (GOMES; ARAYA; CARIGNANO, 2004).

Critério é uma função que reflete as preferências do decisor quanto a um atributo (GOMES; ARAYA; CARIGNANO, 2004).

2.3.2 Considerações sobre os métodos multicritério

No meio empresarial, assim como nos meios acadêmico e governamental é freqüente a necessidade de tomada de decisão. Da mesma maneira, a área de energia elétrica, especificamente, seja nas empresas geradoras, transmissoras, distribuidoras e comercializadoras de energia. Essas decisões são muitas e ocorrem nas áreas de planejamento, alocação de recursos, localização de instalações e infraestruturas e previsões.

Os fatores ou critérios desejáveis em uma decisão complexa se dividem em quantitativos e qualitativos – ou tangíveis e intangíveis, e variam de acordo com o problema. A necessidade de ter mais de um critério de avaliação e de congregar na tomada de decisão fatores com unidades de medida diferentes moveu os estudos da área na direção da análise multicriterial. A tomada de decisão de onde executar ações de manutenção em sistemas de energia elétrica é muito difícil em sistemas complexos como o elétrico, com inúmeros alimentadores de energia, diversos critérios a serem levadas em consideração, diversas

opiniões das áreas envolvidas, vários objetivos conflitantes. Então, a tomada de decisão deve buscar a escolha da melhor alternativa de acordo com a análise de quem decide.

Os métodos multicritérios abordam problemas complexos que conferem ao processo de tomada de decisão, clareza e transparência não utilizados em métodos mono critérios, agregando um valor significativo na tomada de decisão.

Sobre as teorias da metodologia Multicritério de Apoio à Decisão, Borgert (1999, p. 75) reconhecem a necessidade de uma abordagem mais abrangente, através da utilização de múltiplos fatores.

Gomes e Freitas Jr. (2000, p. 83) entendem que tais características destes métodos normalmente incorporam:

a) a análise do processo de decisão em que essa metodologia é aplicada, sempre com o objetivo de identificar informações/regiões críticas;

b) uma melhor compreensão das dimensões do problema;

c) a possibilidade de se ter diferentes formulações válidas para o problema;

d) aceitar que, em problemas complexos, nem sempre as situações devem compulsoriamente encaixar-se dentro de um perfeito formalismo e, em particular, que estruturas que representem apenas parcialmente a comparabilidade entre as alternativas possam ser relevantes ao processo de auxílio à decisão;

e) o uso de representações explícitas de uma estrutura de preferências, em vez de representações numéricas definidas artificialmente, pode muitas vezes ser mais apropriado a um dado problema de tomada de decisão.

Uma questão importante na escolha da técnica mais apropriada é o número de atributos que serão levados em conta (DIEHL, 1999, p. 13). A escolha de poucos atributos pode levar a não consideração de aspectos importantes, mesmo vitais para a análise. De outra forma, muitos atributos podem desviar a atenção dos pontos importantes, ao mesmo tempo em que desperdiçam tempo e energia em pontos fúteis.

Na seqüência são comentados os métodos de análise multicriterial mais utilizados.

2.3.3 Principais Métodos de Análise Multicriterial

A) Escola Francesa:

O conjunto de métodos que utiliza com base a relação de superação passou a ser denominada Escola Francesa do Apoio Multicritério à Decisão (GOMES; ARAYA; CARIGNANO, 2004).

Exemplo: Métodos ELECTRE

B) Escola Americana

Mais orientado para os métodos de utilidade multiatributo (GOMES; ARAYA; CARIGNANO, 2004).

Exemplo: Métodos AHP e MAUT

2.3.4 Comparação entre o método AHP e outros métodos multicritério

Dentre os métodos para avaliar objetivos e critérios múltiplos, destacam-se os métodos AHP, MAUT, Macbeth, Electre.

Guglielmetti, Martins e Salomon (2003) avaliaram os métodos de apoio à decisão de acordo com determinadas características de desempenho. Também, o adaptado de SHIMIZU (2006) evidenciou um quadro comparativo e foram sintetizadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Comparativa da aplicabilidade dos métodos multicriteriais

Características / Modelos	MAUT	AHP	Electre	Mecbeth
Princ. Característica do modelo	Teoria utilidade	Autovetor, autovalor consistência	Teoria da util.	Atratividade TU
Fase de aplicação do processo decisório	Decisão	Decisão	Decisão	Decisão
Aplicações típicas	Classificação	Classificação custo/benefício	Classificação	Classificação
Aplicação do método s/ software	Inviável reunião	Inviável em reunião	Inviável reunião	Inviável reunião
Volume de inform. de entrada	Pouco	Até médio	Pouco	Médio
Parte executada pelo computador.	Maioria	Maioria	Maioria	Maioria
Compreensão conceitual modelo	Médiocplex	Médio a Complexo	Complexo	Complexo
Tempo aprendido 1ª aplicação	Médio	Até médio	Médio	Médio
Compreensão decisor modelo	Médio	Fácil	Médio	Médio
Trata problema complexos/não quantitativo	Sim	Possível	Possível	Possível
Quantidade aplicações práticas	Grande	Grande	Média	Pequena
Conceito na área acadêmica	Bom	Prático e polêmico	n/a	n/a
Volume publicações científica	Grande	Grande	Médio	Pequeno
Tratam dados quant. Subjetivo	Sim	Sim	Sim	Sim
Requer cultura geral adequada decisor	Não	Não	Não	Não
Trabalha intern. com ambigüidade	Não	Sim	Sim	Sim
Flexibilidade casos diferentes	Boa	Grande	Boa	Boa
Pressupõe trabalho em grupo	Indiferente	Recomendado	Indiferente	Indiferente
Requer líder no processo	Desejável	Desejável	Necessário	Desejável
Níveis de atuação do problema	Estratég. Tat. Op	Estratégico tático e oper.	Est. Tat. E op	Est. Tat. e oper.
Capacidade de abrangência	Média	Grande	Média	Média
Ajuda estruturar problema decisão	Não	Não	Não	Não

Fonte: adaptado de Shimizu (2006, p.398-399)

Percebe-se que o método AHP possui algumas vantagens, como grande flexibilidade, pois o método pode ser aplicado com outras ferramentas, tornando-se adequado a estrutura de cada empresa; fácil compreensão do modelo pelo decisor; grande capacidade de abrangência, recomendado para trabalho em grupo e consistência dos julgamentos.

As características de desempenho do AHP que se entende ser mais adequado para o tratamento do problema em estudo, conforme Guglielmetti, Martins e Salomon (2003) são: proporcionar um ranking completo de alternativas, ou seja, forçar o decisor a pensar na decisão de uma maneira lógica (hierárquica); permitir a avaliação de coerência de julgamentos; facilidade de utilização em grupo; facilidade para estruturar o problema; possibilitar o aprendizado sobre a estrutura do problema; proporcionar transparência no processamento e nos resultados; facilidade em lidar com grande número de julgamentos em problemas com muitos critérios e alternativas; possibilidade de tratar quantitativamente um conjunto de variáveis qualitativas, quando usadas essas últimas.

Especificamente para o problema de hierarquização de alimentadores é primordial a adoção de um facilitador (algoritmo) que auxilie na tomada de decisão para a escolha de onde realizar ações de manutenções prioritariamente e com recursos bastante limitados num universo enorme de atividades de manutenção a ser executadas. Para priorizar quais alimentadores dentre os estudados são mais importantes e que deverão ser priorizados para receberem ações de manutenção, deve-se avaliar o ganho de confiabilidade que tal alimentador obterá considerando diversos critérios. O objetivo nesse tipo de problema é definir qual a solução é mais eficaz dentre as soluções consideradas, pois uma solução pode ser ótima para um conjunto de critério e ruim em outra e assim sucessivamente. Portanto, para esse tipo de problema é necessário à aplicação de uma metodologia de análise e decisão multicriterial para determinar a solução mais eficaz e a priorização das soluções possíveis. Entre outros métodos multicriterial 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) utilizadas em problemas multicritérios em sistemas de distribuição de energia. Porém tais metodologias apesar de considerarem a opinião de especialistas da área de estudo, não levam em consideração a sua consistência e importância, pressupondo que serão sempre verdades absolutas. Desta forma, qualquer opinião dos especialistas com qualificação ou não, sempre será considerada, mesmo que suas avaliações resultem para uma solução não desejada. Desta maneira, a metodologia *Analytic Hierarchy Process* (AHP) proposto por Thomas L. Saaty apresenta-se como uma ferramenta adequada para essa restrição, optando-se pela adoção do método AHP.

Em decisão complexa como a da escolha da melhor alternativa, ou plano de ação pode-se envolver mais de um critério e é necessário estudar como cada ação afeta cada critério. Muitas decisões são tomadas sem metodologia ou com metodologias incompletas, isto é, metodologias que não consideram muitos aspectos do problema. O que se tem são métodos que consideram somente um critério, geralmente quantitativos, como custo e benefício. Ou se tem métodos multicriteriais que ainda assim não são capazes de considerar os aspectos qualitativos quando necessário e não podem juntar a opinião de várias partes interessadas do processo decisório.

O método AHP é um dos principais métodos que pode congrega todas essas características, estruturando bem a decisão levando-se a usá-lo no trabalho. O estudo apresentado nesta pesquisa também nos ensinou que bons métodos de decisão são essenciais

nas atividades de manutenção em particular pelas características e pela aplicabilidade. Acredita-se que ele possa trazer ainda grandes contribuições em diferentes possibilidades de solução visto que o trabalho confirma que o método é eficiente para auxiliar na tomada de decisão dos especialistas.

Além disso, justifica-se a utilização do mesmo por ser de fácil adaptação a qualquer cenário montado. Comparado com outros métodos de auxílio à tomada de decisão, o AHP é de fácil montagem e compreensão de seus resultados. Este método também é totalmente adaptável às necessidades do tomador de decisões e, a qualquer momento, o mesmo pode adaptar os critérios, e os pesos dados a cada um deles.

Ainda, salienta-se que, conforme Colin (2007) explica, o AHP deve ser entendido mais como um facilitador, um processo de estruturação do pensamento do que um algoritmo que resolve problemas. Dois dos seus principais benefícios são a imposição de disciplina e a consistência no processo de pensamento, questionando perguntas que às vezes são esquecidas em processos de tomada de decisão.

3 MANUTENÇÕES DE SISTEMAS ELÉTRICOS

Neste capítulo apresentam-se conceitos da gestão estratégica da manutenção, da manutenção de sistemas elétricos, da manutenção em sistemas de distribuição, concluindo com a hierarquização das redes de distribuição.

3.1 Gestões estratégicas da manutenção

Ao longo das últimas décadas, o cliente das concessionárias vem sofrendo com a descontinuidade do sistema de energia elétrica. Vários métodos e práticas de manutenção foram criados sem resultados práticos, levando a crer que não foram adequadamente aplicados, fundamentados pela evolução da manutenção, práticas no Brasil e no mundo e, experiências ao longo destas décadas. O problema da manutenção no setor elétrico brasileiro até 1999 é bem claro. À programação da manutenção nas áreas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica era muito afetada pela pouca comunicação entre as áreas, principalmente, quando o planejamento, a operação e a manutenção trabalhavam com pouca integração na maioria das concessionárias de energia elétrica.

Após esse período, verificam-se, então, novos desafios, principalmente o da maximização da disponibilidade dos sistemas de geração, transmissão e distribuição com o acentuado envelhecimento de seus componentes. Estrategicamente a manutenção nos dias atuais, deve estar voltada para o resultado da empresa, praticando-se a engenharia de manutenção, buscando-se novas tecnologias e novos métodos, estar nivelado com a manutenção de primeiro mundo, isto é, uma manutenção sistêmica. Só desta maneira a continuidade dos sistemas elétricos estará à altura das necessidades dos clientes. Não basta as empresas serem eficiente precisam também, se tornarem eficazes.

Segundo Kardec, Nascif e Baroni (2003), a missão da manutenção é de garantir a disponibilidade da função dos equipamentos e instalações de modo a atender a um processo de produção ou de serviço, com confiabilidade, segurança, preservação do meio ambiente e custos adequados.

Ainda, segundo Kardec, Nascif e Baroni (2003), o aumento da disponibilidade, da confiabilidade, da qualidade do atendimento, da segurança e da redução de custos passa, necessariamente, pela redução da demanda de serviços, que tem as seguintes causas básicas:

Qualidade da manutenção: a falta de qualidade na manutenção provoca o "retrabalho", que nada mais é do que uma falha prematura, gerando custos.

Qualidade da operação: falhas humanas provocam uma falha prematura, não por uma questão da qualidade intrínseca do equipamento/sistema, mas por uma ação operacional incorreta.

Problemas crônicos: existem problemas que são decorrentes da qualidade não adequada do projeto da instalação e do próprio equipamento (hardware).

Problemas tecnológicos: a solução não é de todo conhecida, o que exigirá uma ação de engenharia mais aprofundada que deverá resultar em melhorias ou modernização dos equipamentos/sistemas.

Serviços desnecessários: manutenção preventiva em excesso, sem levar em conta o custo / benefício; insegurança dos homens da manutenção, sem enfoque sistêmico.

Estes conceitos foram baseados em autores que mostram as vantagens de se implantar gestões voltadas para a estratégia, como por exemplo, Kardec, Nascif e Baroni (2003), dentre outros.

Redes e equipamentos precisam ser mantidos para atender as necessidades de mercado num gerenciamento estratégico das empresas.

Urge a necessidade de canalização de grande volume de recursos financeiros para a execução das atividades de manutenção das redes e equipamentos e ainda o mais importante, onde estes recursos deverão ser aplicados prioritariamente. Este problema pode ser visto de dois modos:

3.1.1 Nível componente:

Consiste na realização das manutenções preventivas de modo a manter um setor operando adequadamente sem se preocupar com as implicações ao nível do sistema elétrico, destacam-se os aspectos tecnológicos da manutenção que se manifestam de diversas formas: períodos mais adequados para manutenção, recursos de ferramentaria e de mão de obra, e

outros intrínsecos aos componentes e às equipes de manutenção. Este enfoque corresponde à visão do pessoal ligado a setores da manutenção.

3.1.2 Nível sistêmico:

São os aspectos associados ao desenvolvimento e à gestão dos sistemas de energia elétrica. Este enfoque corresponde à visão dos planejadores e operadores do sistema, cujo objetivo consiste idealmente em não desligar setores para realização da manutenção uma vez que isto reduz a confiabilidade do sistema.

Destacam-se os seguintes aspectos:

- Impossibilidade de armazenamento da energia gerada;
- Capacidade limitada da rede de transmissão;
- Necessidade de se manter um adequado nível de confiabilidade;
- Aleatoriedade da carga, da hidrologia e falhas dos componentes;
- Contratos e tarifas de suprimento, entre outros.

Desta maneira, a modelagem do problema de manutenção deve levar em consideração tanto os aspectos sistêmicos quanto os aspectos do componente da manutenção. Neste contexto sempre existirão divergências conforme analisa Lamy (2001, p. 5) no relatório do SNPTEE citado abaixo:

“Sabe-se que por herança, ou simples cópia dos sistemas de planejamento e programação americanos e europeus, desde a década de setenta, ocorreu durante muitos anos, e ainda ocorre na maioria das empresas do setor elétrico, um excesso indiscriminado de manutenções preventivas, o que tem inferido por todos estes anos, aproximadamente três décadas, uma necessidade de intervenções corretivas devido a problemas onde não havia.”

Praticamente nenhuma empresa possui itens estabelecidos para o controle sistêmico da manutenção. A causa principal dessa realidade é o fato da manutenção ter se envolvido com a rotina de execução, relegando a uma posição secundária as atividades de engenharia. Algumas empresas fazem análise sistêmica de forma insipiente. Todo o quadro anteriormente exposto

tem sua gênese no modelo exaurido de manutenção preventiva. Novos desafios, nova consciência e novas práticas, que nada mais são que uma mudança de cultura, começaram a serem disseminadas no setor elétrico, alicerçadas na manutenção centrada na confiabilidade, qualidade total, incremento das técnicas preditivas e novos modelos organizacionais e gerenciais, como confirmam os exemplos relatados por diversas literaturas do gênero: Lamy (2001), Kardec, Nascif e Baroni (2003).

3.2 A manutenção em sistemas de distribuição de energia elétrica

3.2.1 Definição

Um equipamento projetado para uma determinada vida útil está sujeito a deixar de funcionar ou apresentar baixa eficiência ao longo do seu período de operação. Por esse motivo é necessário obedecer a certa rotina de inspeção e manutenção, mantendo o equipamento operando o mais próximo possível do tempo de vida útil que o mesmo foi projetado.

Pode-se definir manutenção como sendo o conjunto de ações necessárias para conservar ou restaurar um equipamento, de modo a permanecer operando nas condições desejadas e padronizadas pela a operação do sistema. Assim as falhas dos sistemas podem ser evitadas ou pelo menos reduzidas.

Existem diferentes tipos de manutenção. Ela pode prevenir o sistema de alguma possível falha, ou corrigir algum erro já ocorrido em algum equipamento. Os demais tipos de manutenção originaram-se principalmente desses dois modelos básicos.

3.2.2 Tipos de Manutenção

A) Manutenção Corretiva, Daza (2006).

É usada toda vez que a falha é identificada, sem uma previsão exata de quando ela pode ocorrer. Sempre após uma correção deve-se registrar o que foi substituído, qual o problema apresentado pelo equipamento, entre outros dados de operação.

Podemos dividir a manutenção corretiva em três:

a) Manutenção Corretiva de Emergência

Recebe esta denominação quando a manutenção deve ser realizada de imediato, ou seja, quando as condições normais de utilização dos equipamentos, obras ou instalações devem ser restabelecidas assim que descobertas as falhas. É atribuída a elementos de extrema importância ao sistema.

b) Manutenção Corretiva de Urgência

É todo o serviço de manutenção corretiva executado com a finalidade de se proceder, o mais breve possível, o restabelecimento das condições normais de utilização dos equipamentos, obras ou instalações.

c) Manutenção Corretiva Programada

É quando uma falha detectada no seu sistema pode ser resolvida a qualquer momento, não sendo necessária a urgência do serviço de manutenção. Normalmente é aproveitado algum programa ou eventual conveniência para realizá-la.

Existem outras duas modalidades para a manutenção corretiva: Raposo (2004)

- Manutenção Corretiva Paliativa: Quando intervenções são realizadas de maneira provisória para colocar o equipamento em funcionamento.

- Manutenção Corretiva Curativa: Quando intervenções para reparo são realizadas de modo definitivo, restabelecendo a função requerida pelo equipamento.

B) Manutenção Preventiva, Eletrobrás (1982).

É todo o serviço programado com a finalidade de controlar, conservar ou restaurar instalações e equipamentos, visando mantê-los em condições de operação e prevenir possíveis ocorrências que afetem sua disponibilidade.

A prevenção pode ser baseada em estudos estatísticos, conservação do equipamento, local de instalação (adequado ou não), ou então em dados fornecidos pelo fabricante, como suas condições de operação.

Basicamente, são aceitos pelas concessionárias como manutenção preventiva os serviços relacionados a seguir, suportados por uma programação prévia:

- Substituição de condutores, chaves-faca, pára-raios, isoladores, conectores, cruzetas, ferragens, postes, estais, etc.;
- Aumentar ou aliviar a tensão mecânica nos condutores;
- Aprumar a posteação;
- Nivelar cruzetas;
- Remover ou afastar condutores;
- Reapertar conexões;
- Limpar isoladores;
- Medir a resistência de aterramentos;
- Retirada de objetos estranhos da rede;
- Poda de árvores.

C) Manutenção Preditiva, Daza (2006).

A manutenção preditiva, ou acompanhamento preditivo, como citado por alguns autores, tem por objetivo executar a manutenção preventiva em equipamentos no ponto exato em que eles interferem na confiabilidade do sistema. Este modelo de manutenção vem ganhando grande importância atualmente, já que ela tende a intervir no momento adequado, eliminando assim manutenções às vezes desnecessárias. Empresas que possuem um departamento de manutenção suficientemente desenvolvido e organizado para manter a operação do sistema dentro de níveis de qualidade e confiabilidade mínimos têm adotado a manutenção preditiva.

Para prever o momento exato da falha de um determinado equipamento ou alimentador, dentro de uma margem de certeza razoável, é necessária uma rotina de inspeção. O monitoramento constante permite realizar diagnósticos e determina o real estado dos equipamentos ou alimentadores em análise.

Exemplo: a presença de determinados gases no óleo isolante de transformadores pode ser um parâmetro de controle para o estado interno do equipamento. Neste caso, constatada a alteração do parâmetro é possível programar uma intervenção para correção do problema no estágio inicial da falha.

D) Manutenção Detectiva, Raposo (2004).

A manutenção detectiva visa a busca das chamadas falhas ocultas, ou seja, falhas não evidentes para o pessoal de operação e manutenção em situação normal. Falhas ocultas ocorrem em sistemas de proteção de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, nos dispositivos de segurança de processos e nos sistemas de desligamento de emergência. A manutenção detectiva contempla as chamadas tarefas de busca de falhas, através de manutenção preventiva ou testes periódicos na função oculta.

E) Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC), Raposo (2004).

Metodologia que, em termos gerais, baseia suas intervenções nas características inerentes de cada equipamento, relacionando como indicadores sua condição, importância, confiabilidade, local de operação, requisitos de sistema, etc. As tarefas de manutenção são otimizadas através da análise das consequências que determinado equipamento pode fornecer ao sistema em caso de falha, sob ponto de vista de segurança, meio ambiente, qualidade e custos.

Entre os benefícios estão:

- redução das atividades de manutenção preventiva;
- redução dos custos dos programas de manutenção;
- aumento das disponibilidades dos sistemas;
- aumento da vida útil do equipamento;
- redução do número de itens de sobressalentes.

3.3 O planejamento da manutenção nas empresas de distribuição

Nas empresas de distribuição o planejamento da manutenção é elaborado de diversas formas. Existem três políticas principais na literatura para se tratar da manutenção em sistemas de distribuição de energia elétrica, de acordo com a forma com que a manutenção é planejada:

Manutenção Programada é quando uma falha detectada no seu sistema pode ser resolvida a qualquer momento, não sendo necessária a urgência do serviço de manutenção. Normalmente é aproveitado algum programa ou eventual conveniência para realizá-la.

Manutenção Preditiva é uma manutenção preventiva mais exata, um aperfeiçoamento da manutenção preventiva, pois ambas tem a mesma função. Para prever as falhas no sistema utiliza-se de equipamentos, softwares e instrumentos. Devido o sistema de distribuição ser muito extenso, se torna inviável economicamente sua aplicação como um todo no monitoramento dos componentes do sistema.

Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) é uma metodologia estruturada que analisa o desempenho desejado pelo sistema ou equipamento, identifica os modos de falha e suas causas prováveis e por fim a consequência da falha. Com essa análise é possível selecionar as tarefas adequadas de manutenção e direcioná-las para os modos de falhas identificados.

Uma boa política é identificar em cada método seus pontos fortes, integrando-os, para que posteriormente possa-se ligá-los a novas metodologias de manutenção, mais eficaz como a que se propõem, otimizando o sistema de distribuição e reduzindo custos. Para reduzirmos custos, a hierarquização dos alimentadores prioriza o recurso de manutenção preventiva, desde que sejam usados critérios com esse objetivo, escolhido a nível gerencial, e eficazmente.

São recomendados os seguintes critérios ANEEL (2011) através do levantamento **quantitativos** dos dados físicos da rede:

A) Parâmetros: localidade, número de consumidores, consumo industrial, densidade de carga e dimensão da área urbana.

B) Indicadores de Continuidade: DEC, FEC, DIC, FIC, DMIC.

- DEC: (*Duração equivalente de interrupção por unidade consumidora*). Indica o número de horas, **em média**, que um consumidor fica sem energia elétrica durante um período, geralmente mensal.

- FEC: (*Frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora*). Indica quantas vezes, **em média**, houve interrupção na unidade consumidora (residência, comércio, indústria etc.).

- DIC: (*Duração de interrupção por unidade consumidora*). Indica o número de horas que o consumidor ficou sem energia elétrica, durante período considerado.

- FIC: (*Frequência de interrupção por unidade consumidora*). Indica o número de vezes que o consumidor ficou sem energia elétrica, durante período considerado.

- DMIC: (*Duração Máxima de Interrupção por Unidade Consumidora*). É um indicador que limita o tempo máximo de cada interrupção, impedindo que a concessionária deixe o consumidor sem energia elétrica durante um período muito longo.

No cálculo dos índices DEC e FEC, são consideradas apenas parcelas relativas às interrupções não programadas (acidentais) ocorridas no sistema elétrico (para efeito de manutenção). Se o número de falhas for expressivo, deve-se ter em mente, que além da intensificação da manutenção preventiva, outras medidas deverão ser consideradas, pois outros componentes podem afetar o valor dos indicadores de continuidade.

Somente após a análise detida e detalhada das diversas medidas cabíveis para cada conjunto de consumidores, é que se definirá qual alimentador primário deve ser priorizado a fins de manutenção.

3.3.1 À continuidade do serviço prestado de energia elétrica

O desempenho das concessionárias quanto à continuidade do serviço prestado de energia elétrica é medido pela ANEEL com base em indicadores específicos. Se atendidas as exigências da ANEEL, os valores apurados desses índices de continuidade deverão ser comparados com as *Metas de Continuidade de Serviço*, fixadas pela concessionária. Através destas comparações, define-se a necessidade de aplicar uma manutenção preventiva do sistema, ELETROBRAS (1982). Para a análise, priorização e comparações aplica-se a metodologia proposta neste trabalho, o AHP.

O escopo deste trabalho encerra a nível gerencial com a hierarquização dos alimentadores através do método a AHP. A próxima etapa, a nível operacional, o desempenho das redes de distribuição passa a ser individual através de programa de inspeção e manutenção.

Neste nível é de fundamental importância a coleta dos registros do sistema elétrico. Grande parte das informações estará contida nos mapas do traçado das redes e dos alimentadores de distribuição.

Recomenda-se indicar nesses mapas, os consumidores com prioridade de atendimento e identificar a posteação onde estão esses consumidores.

De acordo com os índices operativos, o desempenho de um sistema de distribuição está intimamente relacionado com o seu projeto e construção.

Para uma análise precisa, é necessário encontrar as causas das interrupções, para isto necessita-se de dados precisos, e nem sempre isto é possível devido ao próprio caráter inerente a algumas ocorrências. Índices operativos:

a) *DEC e FEC*: Para efeito de acionamento da inspeção e manutenção, só interessa as parcelas destes índices obtidas para as interrupções não programadas. Porém, dentro dessas falhas no sistema, está intimamente ligada a manutenção somente alguns como objetos estranhos na rede, árvores presas à rede, poluição, falhas em equipamentos e materiais. No caso de pássaros e animais encontrados na rede, vandalismo, erro de operação, acidentes e outras causas, não são relacionados à manutenção.

b) *Frequência de Interrupção*: Devem ser comparadas as normas da ANEEL. Caso os limites sejam ultrapassados, as interrupções ao consumidor devem ser analisadas em sua causa, visando à necessidade da inspeção e manutenção.

c) *DIC e FIC*: Obedece ao mesmo princípio do item (a), porém esses índices são obtidos dentro de um período determinado.

Indicadores operativos são:

a) *Número de operações dos equipamentos*: devem ser obtidas informações do número de operações de: religadores de ramal primário ou linha, religadores e disjuntores com religamento automático em subestações; chaves-fusíveis.

Estas informações indicarão a intensidade dos defeitos existentes no sistema que, se não corrigidos a tempo, resultarão em falhas e interrupções no fornecimento da energia. A manutenção preventiva só deverá ser acionada se o número de operações dos religadores, chaves-fusíveis ou disjuntores ultrapassarem os valores pré-estabelecidos.

b) *Reclamações de Consumidores*: Frequentemente as inspeções são acionadas a partir de reclamações dos consumidores. Quando há grande incidência de reclamações ou quando há

reclamações de consumidores com prioridade no atendimento, é então acionada a inspeção, e conseqüentemente, se necessário, a manutenção.

c) *Taxa de falhas de materiais*: Nesta análise entra materiais como postes de madeira, cruzetas, condutores, isoladores e materiais de conexão (conectores e emendas).

3.4 Hierarquizações das Redes de Distribuição nas empresas

A escolha das redes de distribuição, segundo suas carências de manutenção é denominado priorização ou hierarquização. A hierarquização das redes de distribuição visa estabelecer qual o alimentador, trecho deste ou circuito de baixa tensão, onde os serviços de inspeção serão alocados prioritariamente. A hierarquização é estabelecida através de indicadores relacionados com o desempenho das redes de distribuição, suas condições elétricas e mecânicas e a importância perante o mercado consumidor. Também, poderão ser considerados critérios de diversas naturezas, ou seja, poderá ser adotado qualquer conjunto de variáveis que a concessionária tenha interesse em considerar e disponha de informações. A hierarquização das redes constitui uma atividade sobremaneira importante na elaboração de um programa de inspeção. Para o conjunto das redes que servem a uma localidade, a hierarquização visa responder a pergunta: em que redes de distribuição os recursos de inspeção e, em decorrência, de manutenção deverão ser alocados prioritariamente?

Os principais aspectos das redes de distribuição para a hierarquização são os seguintes: ABRADEE (2002)

3.4.1 Desempenho operativo

Avaliado através dos índices de continuidade de serviços DEC e FEC. São considerados os valores acumulados destes índices, relativos a períodos idênticos ao do programa de inspeção, porém refletindo o desempenho do sistema no passado.

A condição ambiental também está intimamente relacionada ao desempenho dos alimentadores de distribuição. Dentre os fatores, as descargas atmosféricas provocam um grande número de interrupções no sistema de distribuição. Sua incidência é a principal causa

do número de interrupções momentâneas acidentais ocorridas e são causa que poderiam ter sido evitadas pela ação da manutenção preventiva (devido à falta de para-raios e problemas de aterramento) além de estabelecer um referencial para determinar a necessidade de inspeção visual e instrumental. As descargas atmosféricas, enquanto estatística das interrupções, não apenas quantifica as perturbações no sistema de distribuição, mas também **qualifica** se obtidos com suficiente grau de detalhes. Esse critério tem como finalidade distinguir os alimentadores que tem problemas de continuidade de serviço considerando as interrupções não programadas. As descargas atmosféricas são um dos principais fatores responsáveis por interrupções nos alimentadores de distribuição de energia elétrica na empresa, segundo seus técnicos. É também um dos principais fatores responsáveis por interrupções na distribuição de energia elétrica no país, segundo empresas do setor, ou seja, é um dos vilões da manutenção (revista GTD energia elétrica). Assim, quanto ao desempenho operativo foram escolhidos pelos especialistas da empresa os critérios DEC, FEC, e descarga atmosférica, que possuem os seguintes conceitos básicos:

Descarga atmosférica - é um critério quantitativo de criticidade do sistema que informam os pontos frágeis do sistema, como são estado físico da rede de distribuição, número de operações de equipamentos, reclamação de consumidores, taxa de falha de materiais e poda de árvores entre outros;

DEC - duração equivalente por consumidor, relativa apenas às interrupções não programadas ocorridas no alimentador;

FEC – frequência equivalente por consumidor, relativa apenas às interrupções não programadas;

3.4.2 Importância da rede.

É definida a partir de fatores como carregamento, faturamento, número de consumidores atendidos, existência de consumidores com prioridades para o atendimento.

A classificação dos alimentadores de acordo com sua importância cada um com sua Unidade de Negócio podem ser classificadas como:

Alimentadores Classe A

- Órgãos de imprensa
- Processamento de dados
- Hospitais com CTI
- Estações transmissoras de transporte aéreo
- Indústrias especializadas

Alimentadores Classe B

- Hospitais
- Bancos
- Indústrias com altos fornos
- Estações de tratamento de água
- Estádios e ginásios esportivos

Alimentadores Classe C:

- Residências
- Rurais
- Comerciais
- Industriais

Dentre os fatores de importância da rede foram escolhidos para o trabalho pelos especialistas da empresa, carregamento e número de consumidores atendidos. O carregamento é um dos índices de maior importância na seleção de prioridades; são critérios técnicos quantitativos de análise de desempenho do sistema, ou seja, medem o desempenho da continuidade do serviço prestado do fornecimento de energia elétrica.

Conceitos básicos dos critérios escolhidos:

Número total de consumidores atendidos pelo alimentador – quantidade de consumidores que recebem energia elétrica pelo alimentador;

Carregamento - carregamento máximo em % do limite térmico do condutor;

3.4.3 Condições mecânicas e elétricas

Decorrentes da idade da rede e de sobrecargas permanentes nos condutores.

Dentre os fatores de condições mecânicas e elétricas foram escolhidos para o trabalho pelos especialistas da empresa os fatores perdas técnicas e níveis de tensão. O nível de tensão e perdas técnicas além de estar relacionada com a qualidade do produto (Qualidade da Energia Elétrica - módulo 8 do PRODIST), energia elétrica, relacionam o trabalho da manutenção aos resultados corporativos. O critério nível de tensão tem como objetivo identificar a insatisfação de consumidores para cujo atendimento a intervenção da manutenção seja suficiente para restabelecer o nível de tensão adequado.

Conceitos básicos desses critérios:

Perdas técnicas – corresponde ao índice percentual de perdas em relação à demanda máxima aparente do alimentador;

Nível de tensão – corresponde a queda máxima de tensão percentual do alimentador calculada em relação à tensão operativa do alimentador, para o pior ponto.

Uma vez hierarquizadas as redes, para efeito de inspeção, poderão ser definidas as atividades a serem feitas periodicamente, gerando então o programa de inspeção e manutenção.

Como o objetivo do trabalho é apresentar um método multicriterial para hierarquizar as redes, técnicos e engenheiros da empresa de energia elétrica, com experiência e conhecimento do sistema elétrico da permissionária, deram sua contribuição de especialista para a escolha dos critérios, pois o método permite estas opiniões.

3.5 Manutenções de alimentadores

Com os alimentadores hierarquizados inicia-se o programa de inspeção e manutenção com a identificação dos pontos críticos analisando os índices operativos. A partir desta análise, é gerado um relatório de prioridade, passado para equipes de campo realizar as inspeções. Nestas, as verificações são feitas com os eletricitas indo a campo e detectando anomalias observadas a distância cujo registro é feito em relatório próprio de inspeção.

A programação das manutenções das linhas de distribuição é realizada anualmente, com base na experiência da empresa, hierarquização dos alimentadores e relatórios de inspeção de campo. Com a contribuição do nosso trabalho, a hierarquização dos alimentadores deixa de se realizar pela análise dos relatórios de interrupções e passam a ser analisadas pela hierarquização dos alimentadores otimizando o sistema de distribuição e reduzindo custo para empresa. A programação anual é subdividida em trimestres e posteriormente em programações mensais na maioria das empresas visitadas pelo autor, ao longo de sua trajetória de trabalho no setor elétrico. Todos os serviços de manutenção são descritos nesta programação, seguindo um cronograma predefinido. A programação é a linha mestra para as atividades no decorrer do ano, podendo sofrer alterações segundo o que for encontrado nas inspeções ou imprevistos e emergências.

No que tange à manutenção das redes de distribuição, existem várias operações destinadas à sua conservação. Dentre estas, tem-se: troca de condutores, troca de isoladores, troca de equipamentos de proteção (chaves, para-raios, elos fusíveis), troca de postes, substituição de peças corroídas e retensionamento de estais (tirantes de aço que sustentam certos tipos de postes). Na manutenção, as empresas trabalham tanto em linha energizada quanto em linha desenergizada.

As empresas consideram a reposição de qualquer interrupção como prioridade em relação a outras atividades, direcionando todos os recursos para eliminar a falha no menor tempo possível.

4 A METODOLOGIA PARA A PRIORIZAÇÃO MULTICRITERIAL USANDO O MÉTODO AHP

Neste capítulo é abordada a metodologia proposta pelo autor usando método AHP.

4.1 Metodologias proposta para priorização de alimentadores

O objetivo desse trabalho é estabelecer uma metodologia mais eficaz de priorização de alimentadores em uma área piloto do sistema de distribuição de uma concessionária, para o planejamento da manutenção. Para tanto deverá ser verificado os aspectos de qualidade de desempenho dos alimentadores usando a metodologia multicritério para direcionar corretamente os investimentos em manutenção.

Os aspectos de qualidade de desempenho são a continuidade, que representa o grau de disponibilidade do serviço prestado pela concessionária e, em geral, estão associados os indicadores de duração das interrupções, e a frequência com que estas interrupções ocorrem no sistema e a conformidade, que representa a qualidade intrínseca do produto comercializado. Assim, para o setor elétrico, a conformidade descreve o grau de perfeição com que a onda de tensão é disponibilizada para os consumidores.

Esses aspectos devem ser considerados na escolha das alternativas e critérios usados na aplicação do método, além das condições elétricas e mecânicas dos alimentadores e a sua importância perante o mercado consumidor. Também, a experiência e a opinião dos especialistas como parâmetro são consideradas, pois o método possibilita a ponderação dos diversos critérios avaliados.

Com a escolha das alternativas e critérios é necessário utilizar uma metodologia de análise para definir entre as soluções possíveis qual a que melhor contempla a avaliação dos especialistas. Para tanto, utiliza-se a metodologia AHP para a tomada de decisão multicriterial, e a experiência dos especialistas da empresa, que permitirá hierarquizar as soluções possíveis, de acordo com suas prioridades.

Especificamente, segundo esses especialistas da concessionária foram considerados sete critérios relativos a quatro alimentadores selecionados para a análise, considerando que a

hierarquização é estabelecida através de indicadores relacionados com o desempenho das redes de distribuição, suas condições elétricas e mecânicas e a importância perante o mercado consumidor. Também, poderão ser considerados critérios de diversas naturezas, ou seja, poderá ser adotado qualquer conjunto de variáveis que a concessionária tenha interesse em considerar e disponha de informações.

Adicionalmente é necessário esclarecer que esse trabalho só se realizou devido à colaboração da permissionária e dos seus especialistas que forneceram os dados e participaram na estruturação do problema. Foram convidados três engenheiros eletricitas, gestores das áreas de manutenção, operação e planejamento. Foram apresentados os objetivos do trabalho e solicitado a sugestão da área piloto, bem como a disponibilização dos dados técnicos dos alimentadores, preenchimento das planilhas para as matrizes de comparação de critérios e alternativas, levantamento de dados entre outras atividades.

O objetivo de apresentar a possibilidade de soluções do problema hierarquização de alimentadores de sistema de distribuição utilizando algoritmos de apoio à tomada de decisão multicritério representa um assunto de grande importância para as empresas de distribuição de energia, pois permitem várias soluções de como aplicar de forma adequada os recursos destinados à realização da manutenção. Assim, uma metodologia que aponte a melhor solução para a hierarquização de alimentadores representa um benefício de grande importância, otimizando o sistema de distribuição e reduzindo custo para empresa.

4.2 O método AHP

O método AHP, ou Método de Análise Hierárquica, foi desenvolvido pelo Professor Thomas Saaty no final da década de 1970, quando trabalhava no Departamento de Defesa dos Estados Unidos, para obter uma metodologia de análise multicriterial de avaliação de diferentes alternativas. Este método constitui-se em uma técnica para auxiliar o tomador de decisão na estruturação e hierarquização de problemas e situações complexas Gomes (2007).

O método fundamenta-se na comparação dos diversos fatores ou características que podem ser alternativas, atributos ou critérios, a qual é feita aos pares, usando-se uma escala que indica quão forte é a importância de um fator em relação a outro, proposta pelo autor do método. Preenchida a matriz de comparação, calcula-se o autovalor e seu correspondente autovetor.

Para serem realistas, os modelos precisam incluir e medir todos os fatores importantes seja eles qualitativos ou quantitativos tangíveis ou intangíveis.

Com isso, verifica-se que a questão central do método é identificar com que peso os fatores individuais do nível mais baixo de uma hierarquia, influenciam seu fator máximo, ou seja, o objetivo geral, da hierarquização dos alimentadores. Gomes (2004).

4.2.1 Funcionamentos do AHP

O AHP baseia-se em três etapas de pensamento analítico COSTA (2006):

Construção de hierarquias: no método AHP o problema é estruturado em níveis hierárquicos, o que facilita a melhor compreensão e avaliação do mesmo. Para a aplicação desta metodologia é necessário que tanto os critérios quanto as alternativas possam ser estruturadas de forma hierárquica, sendo que o primeiro nível da hierarquia corresponde ao objetivo, neste trabalho a priorização dos alimentadores. O segundo nível da hierarquização são os critérios DEC, FEC, Carregamento, Clientes, Perdas Técnicas, Descarga Atmosférica e Nível de Tensão. O terceiro e último nível da estruturação do trabalho são as alternativas que são os próprios alimentadores 9201, 9202, 9203 e 9204.

Definição das prioridades. Esta etapa consiste na comparação par a par das alternativas e critérios do problema, definindo as prioridades na concepção do ser humano, tendo em vista o foco principal do problema. É possível separar nas seguintes sub-etapas:

Julgamentos paritários: trata-se do julgamento par a par dos elementos de um nível de hierarquia à luz de cada elemento em conexão com o nível superior, compondo as matrizes de julgamento, com o uso da escala numérica de Saaty apresentada na Tabela 4.1. É de extrema importância que as opiniões dos especialistas sejam expressas da forma mais correta e coerente possível, pois esse processo é a base para uma resposta confiável no uso dessa metodologia. Os valores da escala serão empregados na matriz de julgamento da maneira como está especificado na Figura 4.2.

Tabela 4.1- Escala numérica de Saaty: representação numérica das comparações paritárias

Escala Numérica	Escala Verbal	Explicação
1	Ambos os elementos são de igual importância.	Ambos os elementos contribuem com a propriedade de igual forma.
3	Moderada importância de um elemento sobre o outro.	A experiência e a opinião favorecem um elemento sobre o outro.
5	Forte importância de um elemento sobre o outro.	Um elemento é fortemente favorecido.
7	Importância muito forte de um elemento sobre o outro.	Um elemento é muito fortemente favorecido sobre o outro.
2, 4, 6, 8	Valores intermediários entre as opiniões adjacentes.	Usados como valores de consenso entre as opiniões.
Incremento 0.1	Valores intermediários na graduação mais fina de 0.1.	Usados para graduações mais finas das opiniões.

Fonte: Roche e Vejo (2004, p. 6).

$$\begin{array}{cccccc}
 C & A_1 & A_2 & \cdots & A_n \\
 A_1 & 1 & x & \cdots & y \\
 A_2 & 1/x & 1 & \cdots & z \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 A_n & 1/y & 1/z & \cdots & 1
 \end{array}$$

Figura 4.1 - Matriz - exemplo de comparações par a par, ou de julgamento.

Fonte: Saaty (1991)

O preenchimento das matrizes é um procedimento a ser feito pelos especialistas de decisão que conhece o método, ou alguém contratado para fazer isso. Muitas vezes há participantes sem habilidades na ferramenta AHP ou simplesmente não tem tempo para utilizá-la. A esses participantes foram distribuídos questionários mais amigáveis, um modelo de questionário onde o tomador de decisão visualiza bem os elementos que está comparando. Gerentes de uma empresa de energia elétrica precisam decidir qual dos quatro alimentadores de energia elétrica irá se tornar prioritário para ações de manutenção. Os alimentadores estão identificados de AL 9201, AL 9202, AL 9203, e AL 9204. Distribuem-se aos gerentes vários questionários. Nesse tipo de questionário, o participante marca em cada linha a posição que acha mais adequada da importância de um elemento em relação ao outro (SATO, 2005).

Na Figura 4.2, adaptada de um questionário de Sato tem-se um exemplo, foi realizada a comparação entre critérios. Foi criado questionário para a comparação entre critérios em relação ao objetivo, com só uma cópia para cada participante. Outro questionário equivalente, os das alternativas, deve ser preenchida uma folha de questionário em relação a cada critério. Foram aplicados questionários individuais.

Posteriormente as marcações foram transformadas nos números da escala de Saaty, Figura 4.2. Na posição do meio é atribuído 1. Para a esquerda, varia de 1/3 a 1/9, e para a direita varia de 3 a 9.

DEC	1/9	1/8	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1	3	4	5	6	7	8	9	FEC
DEC	1/9	1/8	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1	3	4	5	6	7	8	9	Carreg.
DEC	1/9	1/8	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1	3	4	5	6	7	8	9	Consum.
DEC	1/9	1/8	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1	3	4	5	6	7	8	9	Perdas
DEC	1/9	1/8	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1	3	4	5	6	7	8	9	Desc.
DEC	1/9	1/8	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1	3	4	5	6	7	8	9	QT
FEC	1/9	1/8	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1	3	4	5	6	7	8	9	Carreg.
FEC	1/9	1/8	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1	3	4	5	6	7	8	9	Consum.
FEC	1/9	1/8	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1	3	4	5	6	7	8	9	Perdas
FEC	1/9	1/8	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1	3	4	5	6	7	8	9	Desc.
FEC	1/9	1/8	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1	3	4	5	6	7	8	9	QT
Carreg.	1/9	1/8	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1	3	4	5	6	7	8	9	Consum.
Carreg.	1/9	1/8	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1	3	4	5	6	7	8	9	Perdas
Carreg.	1/9	1/8	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1	3	4	5	6	7	8	9	Desc.
Carreg.	1/9	1/8	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1	3	4	5	6	7	8	9	QT
Consum.	1/9	1/8	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1	3	4	5	6	7	8	9	Perdas
Consum.	1/9	1/8	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1	3	4	5	6	7	8	9	Desc.
Consum.	1/9	1/8	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1	3	4	5	6	7	8	9	QT
Perdas	1/9	1/8	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1	3	4	5	6	7	8	9	Desc.
Perdas	1/9	1/8	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1	3	4	5	6	7	8	9	QT
Desc.	1/9	1/8	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1	3	4	5	6	7	8	9	QT

Figura 4.2 - Exemplo de questionário para o AHP.

Fonte: Adaptado de Sato (2005).

Em se tratando de decisão em grupo, quando a importância de todos os participantes no processo é considerada igual, toma-se a média dos julgamentos de todos eles para formar as matrizes. A média em questão não é a aritmética e sim a média geométrica. Então cada elemento a_{ij} de uma matriz resultante é a média geométrica dos elementos a_{ij} atribuídos pelos participantes.

Após é feita a média geométrica dos julgamentos, pois é a única que funciona para o método AHP conforme conclusão de Rabbani e Rabbani (1996). “O recíproco da média geométrica de um conjunto de julgamentos é a média geométrica dos recíprocos. Isto não é verdade com a média aritmética ou qualquer outra média.” A validade da média geométrica como única maneira de sintetizar julgamentos recíprocos preservando a reciprocidade foi mostrada por Aczel e Saaty, (1983 apud SAATY; VARGAS, 2005). A média geométrica de três elementos se dá pela raiz – cúbica, por serem apenas três elementos – da multiplicação entre esses elementos. O índice da raiz varia de acordo com o número de elementos. Assim, a média geométrica de a, b e c são: $\sqrt[3]{a \times b \times c}$, e assim por diante.

- **Normalização das matrizes de julgamento:** obtenção de quadros normalizados através da divisão de cada elemento pelo somatório dos valores de sua respectiva coluna;
- **Cálculo das prioridades médias locais (PML's):** as PML's são as médias das linhas dos quadros normalizados;
- **Cálculo das prioridades globais:** identifica o vetor de prioridade global (PG), que armazena a prioridade associada a cada alternativa em relação ao foco principal.

Consistência lógica: O ser humano tem a habilidade de estabelecer relações entre objetos ou idéias de forma que elas sejam coerentes, tal que estas se relacionem bem entre si e suas relações apresentem consistência. Assim o método AHP se propõe a calcular a Razão de Consistência (RC) dos julgamentos, representada na equação (1):

$$RC = \frac{CI}{RI} \quad (1)$$

Onde RI é a Inconsistência Aleatória Média, calculada em uma matriz gerada aleatoriamente na escala de julgamentos de 1 a 9, com os valores recíprocos calculados de

modo a forçar sua consistência. Este índice varia de acordo com a ordem da matriz desejada (número de alternativas), sendo apresentado na Tabela 4.2:

Tabela 4.2 - Índice de inconsistência aleatória para até dez alternativas

N	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,51

Fonte: (Costa, 2006)

O Índice de Consistência (CI) é calculado pela equação (2):

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

Onde λ_{max} é o maior autovalor da matriz de julgamentos. A inconsistência máxima dos julgamentos admitida para um problema com 5 ou mais alternativas é 0,10, para 4 elementos é 0,08 e para 3 elementos são 0,05. Se a matriz exceder esse valor máximo, há maneiras de melhorar a consistência, modificando apenas alguns dos julgamentos. No caso de inconsistência igual a zero, o problema é dito absolutamente consistente.

4.2.2 Solução exata usando autovalores e autovetores

O cálculo exato das prioridades de um problema pode ser feito por vários métodos, cujos principais seriam: o método dos mínimos quadrados (LSP), o método dos mínimos quadrados logarítmico (logarithmic LSM) e o método do autovetor Harker P.T. (1987) e SAATY (2003). Segundo estes autores, entretanto, o método do autovetor parece ser o único correto para tratar matrizes que não sejam consistentes. Para formalizar a notação, chama-se cada matriz de julgamentos $n \times n$ de A , relacionando i com as linhas e j com as colunas, com i e $j = 1, 2, \dots, n$.

A solução se dá a partir da estimação do vetor x da matriz, que é o vetor de prioridades. Esse vetor de prioridades deve satisfazer a relação $Ax = cx$, com c constante e $c > 0$. Para satisfazer essa relação, o vetor deve ser um múltiplo positivo do autovetor principal de A e c , deve ser o autovalor máximo de A (SAATY; OZDEMIR, 2003).

Na teoria, a utilização da representação $Ax = cx$ significa que esta se falando de matrizes quase consistentes. Por matriz quase consistente entende-se uma matriz $A = (a_{ij})$ que é uma pequena perturbação de uma matriz consistente $W = (w_i/w_j)$. Matrizes com alto grau de inconsistência não serão tratadas, por serem consideradas matrizes que contem julgamentos aleatórios. Nesses casos os julgamentos teriam de ser refeitos ou passar por métodos de melhoria de consistência.

A representação dos pesos relativos w_i/w_j é eficiente para mostrar a dominância do julgamento de uma alternativa em relação à outra, e é muito usual na literatura. Se o especialista, por exemplo, afirmar que a alternativa 1 é moderadamente mais importante do que a alternativa 2 (nota 3 na escala), o elemento a_{12} da matriz vale $3/1$, isto é $w_1 = 3$ e $w_2 = 1$. E também se sabe que o elemento a_{21} vale $1/3$. A matriz ganha nova representação a seguir, Figura 4.3.

$$\begin{array}{cccc}
 \tau & A_1 & A_2 & \cdots & A_n \\
 A_1 & \frac{W_1}{W_1} & \frac{W_1}{W_2} & \cdots & \frac{W_1}{W_n} \\
 A_2 & \frac{W_2}{W_1} & \frac{W_2}{W_2} & \cdots & \frac{W_2}{W_n} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 A_n & \frac{W_n}{W_1} & \frac{W_n}{W_2} & \cdots & \frac{W_n}{W_n}
 \end{array}$$

Figura 4.3 – Representação racional da matriz consistente

Uma matriz quase consistente $A = (a_{ij})$ é uma pequena perturbação multiplicativa de uma matriz consistente $W = (w_i/w_j)$, e tem um autovetor x , que é uma pequena perturbação do autovetor w da matriz consistente. A relação entre as matrizes obedece ao produto de Hadamard $A = W \times E$, onde a perturbação $E = (\varepsilon_{ij})$ afeta cada termo da matriz

multiplicando-se a ele $(a_{ij}\varepsilon_{ij})$. Também vale que $\varepsilon_{ji} = \varepsilon_{ij}^{-1}$. E quando não há perturbação, $\varepsilon_{ij} = 1$.

O produto Hadamard entre duas matrizes, necessariamente de mesma dimensão é a multiplicação direta entre os termos de mesma posição, então:

$$\begin{matrix} a & b \\ c & d \end{matrix} \times \begin{matrix} x & y \\ z & w \end{matrix} = \begin{matrix} ax & by \\ cz & dw \end{matrix} \quad (3)$$

É freqüente se ver na literatura a relação $Ax = cx$ do cálculo do auto vetor e do autovalor representada por $Aw = \tau_{max}w$, onde $w = (w_1, w_2 \dots w_n)$ é o auto vetor principal e τ_{max} é o auto valor máximo correspondente.

$$\begin{matrix} \frac{w_1}{w_1} & \frac{w_1}{w_2} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ \frac{w_2}{w_1} & \frac{w_2}{w_2} & \dots & \frac{w_2}{w_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{w_n}{w_1} & \frac{w_n}{w_2} & \dots & \frac{w_n}{w_n} \end{matrix} \times \begin{matrix} w_1 \\ w_2 \\ \dots \\ w_n \end{matrix} = \tau_{max}w \times \begin{matrix} w_1 \\ w_2 \\ \dots \\ w_n \end{matrix} \quad (4)$$

E na matriz quase consistente, o somatório em j das perturbações ε_{ij} de seus elementos em relação à matriz absolutamente consistente equivalem a τ_{max} :

$$\sum_{j=1}^n \varepsilon_{ij} = \tau_{max} \quad (5)$$

Dito de outra forma, quando uma matriz tiver uma inconsistência aceitável, ou seja, representar uma perturbação relativamente pequena, a soma de todos os ε_{ij} de uma linha qualquer é igual ao valor de τ_{max} .

Em Saaty (2003), vê-se que $\tau_{max} \geq n$. Somente quando a matriz for consistente, têm-se todos os $\varepsilon_{ij} = 1$, e nesse caso τ_{max} se iguala a n (a ordem da matriz, ou ainda o numero de alternativas). O desvio de τ_{max} em relação à n é então o que possibilita calcular a razão de inconsistência dos julgamentos.

4.2.3 Solução Aproximada

A elaboração de uma formulação simplificada a partir de um estudo de Leal (2008), demonstrada por duas formas já conhecidas de aproximação do cálculo do vetor w , de prioridades retiradas de Winston e Saaty (1994). A busca por um novo estilo de solução, não é nem tanto facilitar os cálculos de sintetização do vetor w , que já são simplificados nas soluções de Winston e Saaty, mas sim promover uma maneira rápida, menos exaustiva o momento em que o especialista deve preencher os questionários de comparação entre critérios ou entre alternativas.

Muitos especialistas que já utilizaram o método AHP poderiam testemunhar sobre a repetitividade e o longo tempo necessário para essa parte do processo, especialmente quando são muitos elementos a ser comparados. Muitos estudiosos do tema expressaram essa dificuldade em artigos, entre eles de Wind e Saaty (1980).

Na solução aproximada de Leal (2008) e as matrizes de Winston e Saaty (1994) não exigem que a matriz seja absolutamente consistente, apenas precisam estar dentro do limite tolerável de inconsistência. Para Leal, a suposição é de consistência. São feitos julgamentos apenas de uma linha.

Assim, uma forma de representar a matriz de julgamento é a Figura 4.4, que atribui $a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1n}$ aos elementos da primeira linha e a partir deles calcula os elementos das outras linhas.

$$\begin{array}{cccc}
 & A_1 & A_2 & \cdots & A_n \\
 A_1 & a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\
 A_2 & \frac{a_{11}}{a_{12}} & \frac{a_{12}}{a_{12}} & \cdots & \frac{a_{1n}}{a_{12}} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 A_n & \frac{a_{11}}{a_{1n}} & \frac{a_{12}}{a_{1n}} & \cdots & \frac{a_{1n}}{a_{1n}}
 \end{array}$$

Figura 4.4 – Representação da matriz preenchida consistentemente a partir dos valores da primeira linha.

A seguir vê-se como fica a adaptação desta matriz segundo os passos propostos por Winston e depois o de Saaty. Chega ao mesmo resultado final de prioridades, no caso da matriz consistente de Leal.

Solução de Leal pelos passos de Saaty

Para a matriz de Leal, Figura 4.4, vão-se obter o vetor de prioridades usando os passos da solução de Saaty.

Primeiro passo: Fazer o somatório das linhas.

Vai-se considerar que o denominador dos elementos da primeira linha seja a_{11} , que vale sempre 1 por ser a comparação de uma alternativa em relação a ela mesma.

Sendo assim, o somatório da primeira linha, é:

$$S_1 = \frac{a_{11}}{a_{11}} + \frac{a_{12}}{a_{11}} + \dots + \frac{a_{1n}}{a_{11}} \quad (6)$$

Ou então

$$S_1 = \frac{1}{a_{11}} \times \sum_j a_{1j} \quad (7)$$

E para a K-ésima linha

$$S_k = \frac{1}{a_{1k}} \times \sum_j a_{1j} \quad (8)$$

Segundo passo: Fazer o somatório.

A soma de todos os elementos da matriz é a soma do valor de todas as linhas:

$$S_{total} = \sum_j \frac{1}{a_{1j}} \times \sum_j a_{1j} \quad (9)$$

Terceiro passo: Dividir a soma de cada linha pela soma total.

$$Pr_1 = \frac{\frac{1}{a_{11}} \times \sum_j a_{1j}}{\sum_j \frac{1}{a_{1j}} \times \sum_j a_{1j}} \quad (10)$$

O que dá:

$$Pr_1 = \frac{\frac{1}{a_{11}}}{\sum_j \frac{1}{a_{1j}}} = \frac{1}{a_{11}} \times \frac{1}{\sum_j \frac{1}{a_{1j}}} = \frac{1}{\sum_j \frac{1}{a_{1j}}} \quad (11)$$

E para a K-ésima linha, a prioridade é:

$$Pr_K = \frac{1}{a_{1k}} \times \frac{1}{\sum_j \frac{1}{a_{1j}}} = \frac{1}{a_{1k}} \times Pr_1 \quad (12)$$

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.

4.2.4 Limitações do método AHP

A necessidade de conhecimentos matemáticos para o uso do método pode ser considerado como uma limitação. No entanto, esta não é a principal crítica para o uso do AHP. Conforme Bana e Costa (2008), um dos problemas do método ocorre nas escalas, a partir da matriz positiva recíproca preenchida após os questionamentos feitos ao especialista. É necessário dispor-se de informação completa sobre as preferências intracritérios dos especialistas, o que na maioria dos casos práticos, é muito difícil de ser obtido. O problema implica na quantificação das prioridades e não na ordem em que as alternativas são priorizadas, não interferindo no objetivo final, que é a hierarquização dos alimentadores.

5 APLICAÇÕES DO MÉTODO AHP NA HIERARQUIZAÇÃO DE ALIMENTADORES DE REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Considerando a proposta deste trabalho, pesquisou-se um tema para a abordagem fundamentada no emprego de um dos métodos de auxílio à tomada de decisão considerando múltiplos critérios mais reconhecidos cientificamente – o Método da Análise Hierárquica (*Analytic Hierarchy Process - AHP*).

O método foi aplicado para obter um ranking entre alimentadores do sistema de distribuição de energia elétrica de uma subestação da permissionária COPREL.

A hierarquização irá identificar qual será o alimentador prioritário, ou seja, aquele que deverá receber primeiro as ações de manutenção considerando vários critérios.

5.1 Etapas do procedimento proposto para aplicação do método AHP

Foi utilizada a proposta de Marins, Souza e Freitas (2006) na aplicação do método AHP para a hierarquização dos alimentadores da subestação de Cruz Alta do sistema distribuição de energia elétrica da permissionária COPREL. A Figura 5.1, demonstra as etapas do processo de avaliação das alternativas para tomada de decisão propostas por este trabalho a seguir comentadas.

Primeiramente o problema é modelado e são definidos os elementos e os procedimentos que deverão compor o modelo de hierarquização dos alimentadores.

A seguir, para a execução, foram estabelecidas as matrizes de comparação das alternativas e critérios e calculada a razão de consistência das matrizes, além da construção dos vetores de prioridade global. Nesta etapa se avaliam as alternativas por meio de combinações binárias (de pares) para cada um dos critérios utilizados e foram expressas as preferências atribuindo um valor numérico a cada comparação utilizando a escala de Saaty. Com base nas decisões binárias feitas pelo decisor, é construída a matriz de comparação por pares para cada critério estabelecido.

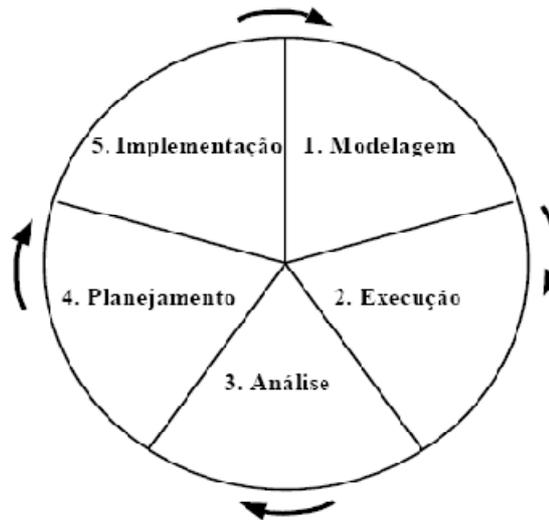


Figura 5.1 – Etapas do processo de avaliação para tomada de decisão.

Fonte: Marins, Souza e Freitas (2006).

A partir da aplicação do AHP, é verificada a variação do vetor de prioridades entre duas situações. O método foi executado para a matriz original do estudo (exata), resolvendo pelo autovetor/autovalor, e a situação em que se toma a linha correspondente à alternativa de maior propriedade da matriz original, que simplesmente é a que tem o maior resultado na soma de seus valores, resolvendo usando a simplificação do método.

Logo após faz-se a análise dos dados coletados. Através do vetor de prioridade global e do desempenho das alternativas à luz dos critérios de avaliação, é definida a hierarquia das alternativas da melhor para pior. Durante a análise dos dados, foi verificada a consistência do método através do grau de inconsistência nos julgamentos. Com base no resultado obtido na análise anterior, é definido o planejamento do processo de hierarquização dos alimentadores da subestação de Cruz Alta. O resultado será repassado para os gestores que definirão como ocorrerá o processo de implementação. Nesta etapa também se deve identificar ações corretivas viáveis nos alimentadores hierarquizados através de inspeções, que depois de implementadas, possam proporcionar melhorias. Segundo Freitas e Costa (2001), estas ações devem ser avaliadas quanto ao risco, ao custo e recursos necessários para a melhoria da qualidade desejada, permitindo priorizar as ações que busquem solucionar problemas mais críticos, de forma menos onerosa e em menor tempo possível.

5.2 Estudos de caso

Muitos problemas de manutenção de um sistema de distribuição de energia elétrica, assim como de outras áreas de conhecimento, envolvem tomados de decisões. Estas decisões são complexas, e a escolha da melhor alternativa, ou plano de ação, pode envolver mais de um critério sendo necessário estudar como cada ação afetará cada critério. Muitas vezes tem-se que tratar quantitativamente um conjunto de variáveis qualitativas.

A determinação dos alimentadores de uma mesma subestação se deve a ter-se uma amostra real de uma determinada região típica do sistema da permissionária, ou seja, área rural de grande extensões e pouca densidade populacional. Essa amostra é utilizada somente para demonstrar a aplicação do modelo proposto neste trabalho. Pode-se, utilizando o mesmo raciocínio, priorizar alimentadores de áreas diferentes, com critérios diferentes dos propostos, adaptando o método à necessidade de cada tomador (ou tomadores) de decisão. O método AHP proposto por Thomas L. Saaty foi utilizado para auxiliar na decisão, onde os critérios são relacionados e são moldados e avaliados de acordo com a percepção dos tomadores de decisão. Este trabalho apresenta duas maneiras de chegar à solução.

A primeira solução explorada é o cálculo exato através dos autovalores e autovetores das matrizes. A seguir é feita uma proposta de solução aproximada, que examina a idéia original de que certo nível de inconsistência é desejável. É uma solução simplificada que, supondo consistência absoluta, facilita não só os cálculos como o trabalho inicial dos tomadores de decisão. Em vez de comparar todas as alternativas com as outras, duas a duas, passa a ser necessário comparar apenas uma alternativa com as outras. A nova solução aproximada é comparada com a solução exata neste estudo de caso.

5.2.1 Modelagem do problema

No estudo de caso será utilizado o modelo do AHP completo através da comparação de alternativas e critérios, sendo que as alternativas são os próprios alimentadores a serem hierarquizados e os critérios são as características a serem observadas em cada alimentador baseados nos aspectos de qualidade de desempenho do mesmo. A Figura 5.2 mostra a estruturação do modelo hierárquico para o problema proposto. Foram definidos três níveis de

hierarquização utilizados na análise do problema: o primeiro nível é ocupado pela meta ou o problema, hierarquização dos alimentadores, o segundo, pelos critérios DEC, FEC, carregamento, número de consumidores, descarga atmosférica, nível de tensão e perdas de distribuição, o terceiro, ocupado pelos alimentadores 9201, 9202, 9203 e 9204 referentes a cada um dos critérios selecionados.

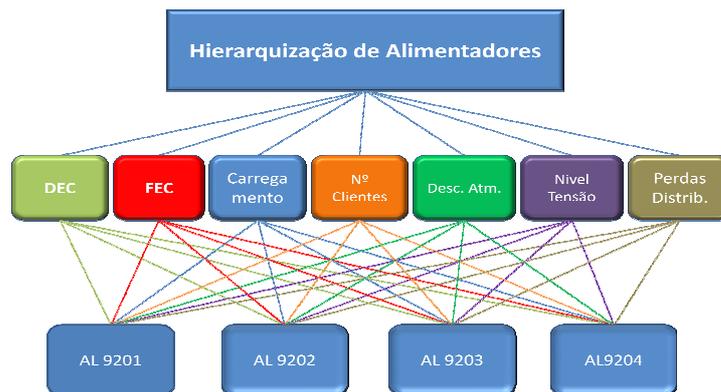


Figura 5.2 – Modelo hierárquico de estruturação adaptado ao estudo de caso – Fonte: Saaty (1991)

5.2.2 Execução da Solução Exata

O cálculo exato das prioridades de um problema pode ser por vários métodos, cujos principais seriam: o método dos mínimos quadrados (LSM), o método dos mínimos quadrados logarítmicos (logarithmic LSM) e o método do autovetor Harker P.T. (1987) e SAATY (2003).

Segundo estes autores, entretanto, o método do autovetor parece ser o único correto para tratar matrizes que não sejam consistentes. Um exemplo de cálculo completo da solução exata é apresentado no item I letra a do apêndice A.

A) Opiniões e Avaliações

Após a definição da estrutura do problema com a elaboração do objetivo, critérios e alternativas, os gestores passam à fase seguinte do método, onde fazem as comparações entre elementos de mesmo nível, gerando as chamadas matrizes de comparação ou matrizes de julgamento.

Na comparação par a par entre elementos, o tomador de decisão começa a estabelecer prioridades. São feitas comparações par a par entre os n elementos de um mesmo nível, tomando como critérios os elementos do nível imediatamente acima. Essas comparações permitem medir a contribuição de todos os critérios, inclusive dos critérios qualitativos quando existirem. O decisor usa sua experiência na área e sua intuição para comparar as alternativas. Na estrutura da Figura 5.2, o primeiro elemento considerado é a Hierarquização dos alimentadores, e ele funciona como critério de comparação para os elementos do nível seguinte, os critérios DEC, FEC, carregamento, número de consumidores, descarga atmosférica, nível de tensão e perdas de distribuição. Assim, o primeiro passo é comparar os n critérios entre si, dois a dois, em relação à contribuição de cada um para o objetivo geral, a hierarquização dos alimentadores. Depois se segue à comparação entre alternativas, os alimentadores, em relação a cada critério.

O preenchimento das matrizes é um procedimento a ser feito pelos especialistas que entendam do método, ou alguém contratado para fazer isso. Muitas vezes há participantes sem habilidades na ferramenta AHP ou que simplesmente não tem tempo para utilizá-la. A esses participantes podem ser distribuídos questionários mais amigáveis, desde que alguém entenda o método para depois trabalhar com as matrizes.

Existe um modelo de questionário onde o tomador de decisão visualiza os elementos que está comparando. Nesse tipo de questionário, o participante marca em cada linha a posição que considera mais adequada na importância de um elemento em relação ao outro. Na Figura 4.2, adaptado de um questionário de Sato (2005), tem-se um exemplo das opiniões dos gestores.

Foram aplicados questionários individuais para os três especialistas, onde cada um julga todos os critérios e alternativas. Após, é feita a média geométrica dos julgamentos, pois é a única média que funciona para o método AHP, validada por Aczel e Saaty (1983 apud SAATY; VARGAS, 2005).

Como alternativas, foram considerados quatro alimentadores de distribuição da Subestação de Cruz Alta, no município de mesmo nome no Rio Grande do Sul, pertencente à

permissionária COPREL. São eles na Figura 2.2: ALS 9201; 9202; 9203; 9204 todos de característica rural, radiais, constituído de um tronco principal que, partindo da subestação de distribuição, alimenta os diversos ramais de grande extensão linear e de baixa densidade de carga, nas quais o circuito toma direções distintas face às próprias características de distribuição da carga.

Para cada critério, foram definidos os alimentadores que melhor refletem as falhas do sistema tais como, falhas em equipamentos, ação de animais, mau tempo, árvores, falhas humanas, dentre outras diversas causas.

A definição dos pesos relativos para cada um dos critérios, em relação ao objetivo, para cada um dos alimentadores em relação aos critérios, tomou como base a proposta de Saaty (1990), que tem como objetivo determinar, em termos numéricos, dentro de uma escala de valores predefinidos, as prioridades dos elementos de um nível em relação a um nível superior, permitindo ainda, a análise quanto à importância de cada um dos critérios selecionados, mostrando seu grau de influência na hierarquização dos alimentadores.

B) Estabelecimentos das prioridades

Nesta etapa, procura-se estabelecer a importância relativa de cada critério de decisão. Serão feitas comparações binárias entre os critérios, se fará a matriz normalizada e definirá o Vetor de Ponderação de Critérios.

A montagem da matriz de comparação foi feita pelos gestores da COPREL. Com o auxílio da tabela de Saaty (Tabela 4.1) foi possível estabelecer a preferência de cada critério par a par, em relação ao objetivo geral, ou seja, qual critério é mais significativo para o sistema como um todo. Após essa avaliação é possível estimar a partir da média geométrica das linhas da matriz de comparação de critérios, gerando a matriz “W” - vetor prioridade. Nessa tabela, apresenta-se como exemplo a matriz normalizada de comparação entre critérios e o vetor prioridade nos mostra o “nível de tensão” como o critério mais importante conforme linha sete da matriz da Tabela 5.1, pois a linha de maior prioridade é a que tem maior soma dos valores de seus elementos e confirmado pelo cálculo exato do vetor de prioridades “W”.

Tabela 5.1 – Matriz de julgamento dos critérios a luz do objetivo geral

Prioridades	DEC	FEC	Carreg	Nº Consu.	Perdas	Desc. At.	Q. Tensão	Vetor Prio
DEC	1	1	2,7589	1,310371	0,6934	1	0,321830	0,1271643
FEC	1	1	2,1898	1,442250	1,2599	0,584804	0,333333	0,1252556
Carreg.	0,363	0,4567	1	0,242643	0,4409	0,485286	0,242643	0,0532674
Nº Consum.	0,763	0,6934	4,1213	1	1,4423	1,087380	0,829827	0,1550830
Perdas	1,442	0,7937	2,2680	0,693361	1	0,693361	0,321830	0,1120806
Desc. Atm.	1	1,7000	2,0606	0,919641	1,4423	1	0,669433	0,1500570
Queda Tens	3,107	3	4,1213	1,205071	3,1072	1,493802	1	0,2770923
RC	0,033							

O RC mede a inconsistência dos julgamentos de uma matriz, e tem como valor aceitável até 0,1 no caso de cinco ou mais alternativas, 0,09 para quatro elementos e 0,05 para três elementos. Quando $RC = 0$, a matriz é dita absolutamente consistente (LIBERATORE; NYDICK, 1997).

Se o resultado da razão de consistência for menor que 0,1, segundo Saaty, os julgamentos podem ser considerados coerentes. Se o resultado da razão de for menor que 1,32, nas matrizes de ordem 7, segundo Saaty, os julgamentos podem ser considerados coerentes. Portanto a inconsistência da matriz Tabela 5.1, também é aceitável, pois o valor da razão de consistência calculado é de 0,033427.

C) Prioridades Médias Locais (PML's)

Igualmente para o julgamento paritário das alternativas a luz dos critérios de avaliação, foi ouvida gestores da COPREL da área de Planejamento, Manutenção e Operação, que compararam par a par as alternativas elencadas para cada um dos critérios estabelecidos atribuindo um valor numérico de acordo com a Escala de Saaty, possibilitando à construção da matriz de comparação das alternativas a luz dos critérios de avaliação. O cálculo das médias geométricas das opiniões dos especialistas foi calculado no apêndice A item II. A última coluna das Tabelas 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7 e 5.8 apresentam a prioridade média local (PML) das alternativas à luz de cada critério. Nota-se que cada critério apresenta um respectivo alimentador como prioritário, podendo ser diferente quando comparados em relação a outros critérios. Isso é identificado através dos valores das PML's.

Tabela 5.2 – Matriz de julgamento das alternativas a luz do critério DEC

DEC					
	9201	9202	9203	9204	PML's
9201	1	4, 717694	0, 928318	5, 943922	0, 443193
9202	0, 211968	1	0, 693361	3, 301927	0, 17252
9203	1, 077217	1, 44225	1	4, 308869	0, 319518
9204	0, 168239	0, 302853	0, 232079	1	0, 064768
				$\lambda_{\max} =$	4, 23111

Tabela 5.3 - Matriz de julgamento das alternativas a luz do critério FEC

FEC					
	9201	9202	9203	9204	PML's
9201	1	3, 979057	1, 587401	5, 192494	0, 47646
9202	0, 251316	1	0, 693361	3, 301927	0, 177299
9203	0, 629961	1, 44225	1	4, 121285	0, 276188
9204	0, 192586	0, 302853	0, 242643	1	0, 070053
				$\lambda_{\max} =$	4, 107247

Tabela 5.4 - Matriz de julgamento das alternativas a luz do critério carregamento

Carregamento					
	9201	9202	9203	9204	PML's
9201	1	1, 817121	1	2, 080084	0, 332848
9202	0, 550321	1	1	1, 817121	0, 239564
9203	1	1	1	2, 080084	0, 286075
9204	0, 48075	0, 550321	0, 48075	1	0, 141513
				$\lambda_{\max} =$	4, 0383

Tabela 5.5 - Matriz de julgamento das alternativas a luz do critério N° Clientes

N° Clientes					
	9201	9202	9203	9204	PML's
9201	1	4, 717694	3, 556893	5, 277632	0, 586032
9202	0, 211968	1	0, 87358	2, 080084	0, 152306
9203	0, 281144	1, 144714	1	2, 080084	0, 172858
9204	0, 189479	0, 48075	0, 48075	1	0, 088804
				$\lambda_{\max} =$	4, 05318

Tabela 5.6 – Matriz de julgamento das alternativas a luz do critério Perdas Distribuição

Perdas Distrib.					
	9201	9202	9203	9204	PML's
9201	1	1, 44225	0, 90856	1, 957434	0, 298281
9202	0, 693361	1	2, 080084	2, 620741	0, 328886
9203	1, 100642	0, 48075	1	2, 289428	0, 248869
9204	0, 510873	0, 381571	0, 43679	1	0, 123963
				$\lambda_{max} =$	4, 14926

Tabela 5.7 – Matriz de julgamento das alternativas a luz do critério Descargas Atmosféricas

Descargas Atmosféricas					
	9201	9202	9203	9204	PML's
9201	1	3	2, 154435	1, 259921	0, 393709
9202	0, 333333	1	0, 550321	0, 669433	0, 13819
9203	0, 464159	1, 817121	1	1	0, 223681
9204	0, 793701	1, 493802	1	1	0, 244419
				$\lambda_{max} =$	4, 04325

Tabela 5.8 - Matriz de julgamento das alternativas a luz do critério Nível de Tensão

Nível de Tensão					
	9201	9202	9203	9204	PML's
9201	1	1, 44225	1, 817121	2, 714418	0, 377857
9202	0, 693361	1	1, 44225	2, 289428	0, 28449
9203	0, 550321	0, 693361	1	1, 817121	0, 211256
9204	0, 368403	0, 43679	0, 550321	1	0, 126397
				$\lambda_{max} =$	4, 00793

D) Análise a consistência das opiniões

A inconsistência surge quando algumas opiniões da matriz de comparação se contradizem com outras. Por isso, é importante verificar a consistência das opiniões efetuando uma série de cálculos que indicam consistência ou não da matriz de comparação. De acordo com Marins, Souza e Freitas (2006), os procedimentos para o cálculo da Relação de Consistência (RC) e o Índice de Consistência (CI) fora mostrado no item 4.2.1 do capítulo 4.

Para chegar-se ao RC basta dividir o CI pelo índice de Inconsistência Aleatória Média (RI), uma constante cujo valor dependerá da dimensão da matriz que estamos analisando e assim obtemos a Relação de Consistência (RC). A Tabela 4.2 apresenta os Índices de Inconsistência Aleatória, n – dimensão da matriz.

Do ponto de vista do AHP, é desejável que a RC de qualquer matriz de comparação seja menor ou igual a 0,10. Então é necessário verificar as opiniões dos especialistas são consistentes. Calcula-se o RC para cada matriz através das equações (1) e (2). Nas matrizes de ordem 4, RI igual a 0,09 e na matriz de ordem 7, RI será igual a 0,132, conforme indica a Tabela 4.2. O índice RC das matrizes é indicado na tabela 5.10 e 5.11.

Se o resultado da razão de for menor que 0,09, nas matrizes de ordem 4, segundo Saaty, os julgamentos podem ser considerados coerentes.

Sendo assim, os julgamentos dados para as matrizes nas Tabelas 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7 e 5.8 são coerentes, pois os valores das razões de consistência calculados são menores que 0,09 não sendo necessária a correção no julgamento, pois o resultado final como verificado abaixo não foi alterado. Poderia se usar os métodos de melhoria de consistência de julgamentos como de Harker P.T. (1987) e SAATY (2003) caso fosse necessário. Portanto a inconsistência das matrizes de comparação à luz de cada critério é aceitável.

É bom destacar que é calculado um λ_{max} para cada matriz de julgamentos do problema, isto significa dizer que se calcula a inconsistência de cada comparação separadamente.

Tabela 5.9 – Índices de Consistência e Razões de Consistência das matrizes de julgamentos dos alimentadores a luz de cada critério.

Critérios	Índice	
	CI	RC
DEC	0,077037195	0,085597
FEC	0,035748902	0,039721
Carregamento	0,012766498	0,014185
Nº de Consumidores	0,017726167	0,019696
Perdas Técnicas	0,04975289	0,055281
Descarga atmosférica	0,014416533	0,016018
Queda de Tensão	0,002642794	0,002936

E) Desenvolvimento de um Vetor de Prioridade Global

Para finalizar os cálculos da análise, é necessário multiplicar cada vetor prioridade média local da matriz das alternativas, os PML's, pelo Vetor de Prioridade da matriz de Critérios. As prioridades globais são calculadas conforme Equação (13) e mostrado na Tabela 5.10 o resultado.

$$PG(AL9201) = VP(cr1) \times PLM(AL9201)_{cr1} + VP(cr2) \times PLM(AL9201)_{cr2} + \dots + VP(cr7) \times PLM(AL9201)_{cr7} \quad (13)$$

As outras prioridades globais podem ser calculadas pela substituição do “PLM (AL9201)” pela PLM do AL a ser calculado. A Tabela 5.10 apresenta os resultados.

Tabela 5.10 - Prioridades Globais dos AL's da SE de Cruz Alta, ou seja, o alimentador que deve ser priorizado para receber manutenção.

PG = 1	0, 421862813	AL 9201
PG = 3	0, 216955335	AL 9202
PG = 2	0, 237266878	AL 9203
PG = 4	0, 123914974	AL 9204

Com os resultados, surge uma nova tabela com a pontuação final obtida por cada alternativa, Tabela 5.11:

Tabela 5.11 - Matriz das Prioridades Médias Locais (PML's) e Prioridades Globais (PG)

Alternativa	DEC	FEC	Carreg	Nº Clientes	Perdas	Desc. Atm.	Q. Tensão	Prioridade Global
AL 9201	0,44 3	0,476 5	0,3329	0,586032	0,2983	0,393709	0,377857	0,4218628
AL 9202	0,17 3	0,177 3	0,2396	0,152306	0,3289	0,13819	0,28449	0,2169553
AL 9203	0,32 0	0,276 2	0,2861	0,172858	0,2489	0,223681	0,211256	0,2372669
AL 9204	0,06 5	0,070 1	0,1415	0,088804	0,1240	0,244419	0,126397	0,1239150

Na Figura 5.3, tem-se a árvore de decisão. Esta facilita a visualização dos resultados para cada um dos alimentadores e também para os valores dados para cada um dos critérios nesses alimentadores.

Portanto com o método AHP, tem-se uma indicação do melhor alimentador para executarmos as ações de manutenção dentre as proposta de hierarquização, para os critérios utilizados e pesos dados para cada um deles, de acordo com a visão dos gestores.

Isso significa que, o alimentador 9201 tem prioridade nos investimentos da empresa para o planejamento da manutenção, sendo que a distribuição dos recursos destinados para esse fim deve ocorrer de forma proporcional aos PG's calculados pelo método AHP, PG (9201) = 42%; PG (9202) = 22%; PG (9203) = 24% e PG (9204) = 12%.

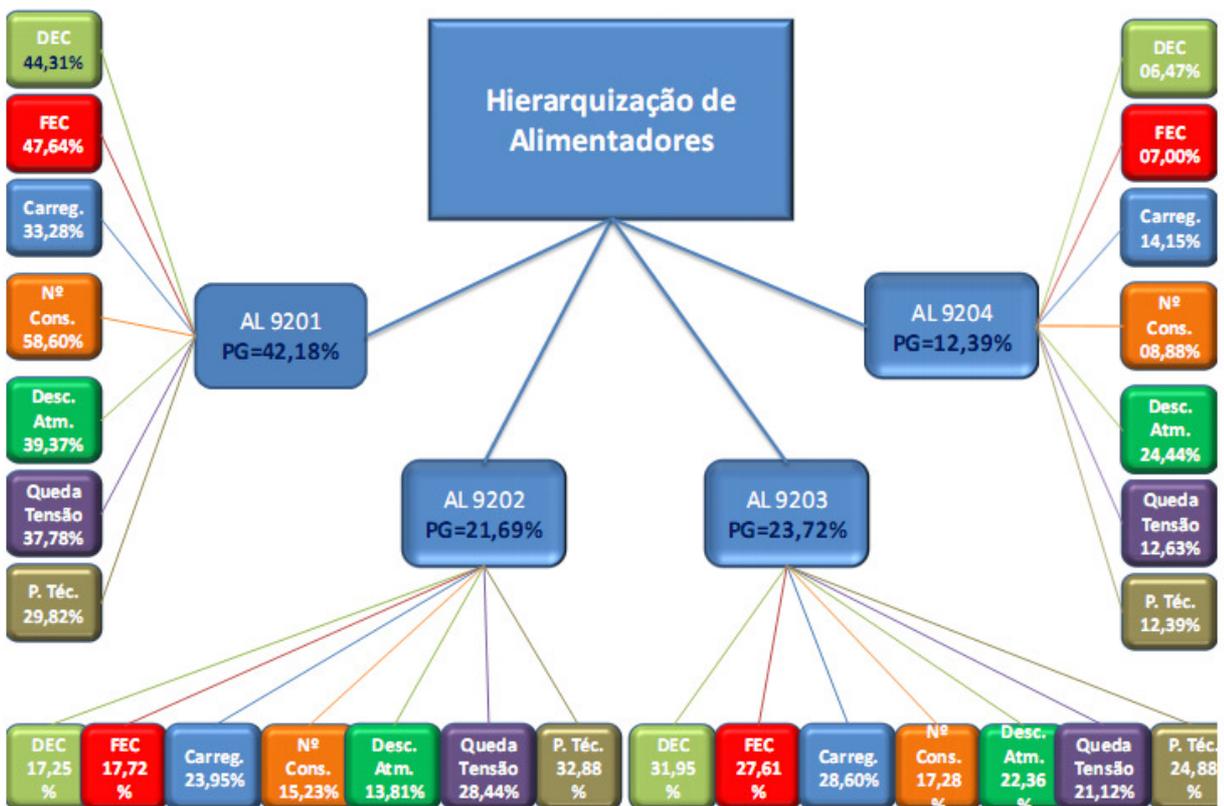


Figura 5.3 – Árvore de decisão.

5.2.3 Execução da Solução Aproximada

Neste item é feita a elaboração de uma formulação simplificada a partir de um estudo de Leal (2008), demonstrada por duas formas já conhecidas de aproximação do cálculo do vetor w de prioridades retiradas de Winston (1994) e Saaty (1990). Os cálculos de sintetização do vetor w , já são simplificados nas soluções de Winston e Saaty, mas na necessidade de se tornar menos exaustivo o momento que o tomador de decisão deve preencher os questionários de comparação entre critérios ou entre alternativas, cria-se este novo estilo de solução. Muitos especialistas que já utilizaram o método AHP poderiam testemunhar sobre a repetitividade e o longo tempo necessário para essa parte do processo, especialmente quando são muitos elementos a ser comparados. Muitos estudiosos do tema expressaram essa dificuldade em artigos inclusive Wind e Saaty (1980). Os métodos de sintetização simplificada de Winston e o de Saaty **facilitam os cálculos somente**, necessitando ainda que sejam feitas todas as comparações entre as alternativas.

Devido à quantidade exaustiva de comparações que devem ser feitas pelos especialistas na solução exata e muitas vezes as decisões são tomadas em grupo e nem todos os participantes se mostram disponíveis a fazer comparações repetitivas, surge à simplificação da coleta de dados, Wind e Saaty, (1980) sugerindo que sejam elaboradas estruturas que necessitam menos comparações, Leal (2008). A grande vantagem é que o número de comparações diminui dramaticamente, de $n(n - 1) / 2$ para $n - 1$, e a solução pode ser calculada com o uso de uma calculadora simples ou em qualquer planilha eletrônica, como o EXCEL.

Nesta simplificação uma única alternativa seria comparada com cada uma das outras, diferente do processo original onde todas as alternativas são comparadas, par a par, com as outras. Para isto, toma-se a linha de maior importância da matriz de comparação entre critérios da Tabela 5.12, ou seja, a linha que tem o maior resultado na soma de seus valores da matriz original de julgamentos, nas cãs em estudo, a linha número sete, nível de tensão e resolve-se usando a simplificação. Essa linha fornece todos os números suficientes para o cálculo das prioridades, adaptado Leal (2008). Portanto essa linha será a referência para o cálculo de todas as outras. Numa suposição de consistência no restante dos valores não mostrados, usa-se a solução aproximada conforme as equações (14) e (15). Os resultados dos vetores prioridades dos critérios são mostrados na Tabela 5.13.

Tabela 5.12 - Matriz de comparação entre critérios

ALS	DEC	FEC	Carreg.	Nº Clientes	Perdas	Desc. Atm.	Nível tensão
DEC	1	1	2,75892	1,31037069	0,69336	1	0,32182979
FEC	1	1	2,18976	1,44224957	1,25992	0,5848035	0,33333333
Carreg.	0,36246	0,45667	1	0,24264275	0,44091	0,4852855	0,24264275
Nº Cliente	0,76314	0,69336	4,12128	1	1,44225	1,0873803	0,82982653
Perdas	1,44225	0,7937	2,26803	0,69336127	1	0,6933612	0,32182979
Desc.Atm.	1	1,70997	2,06064	0,91964139	1,44225	1	0,66943295
Nív.Tensão	3,107233	3	4,12128	1,205071132	3,107233	1,49380158	1

$$Pr_1 = \frac{1}{\sum_j \frac{1}{a_{1j}}} \quad (14)$$

$$Pr_K = \frac{1}{a_{1k}} \times Pr_1 \quad (15)$$

Tabela 5.13 - Vetores Prioridades dos Critérios

Pr DEC	0,086539088
Pr FEC	0,089632356
Pr Carregamento	0,065245924
Pr Nº Consum.	0,223137921
Pr Perdas	0,086539088
Pr Desc. Atm.	0,180008557
Pr Queda Tensão	0,268897067

As sete matrizes de comparação dos pares a luz de cada critério Tabelas 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7 e 5.8, são reduzidas à linha de maior prioridade, a de maior soma de seus elementos, Tabelas 5.14, 5.15, 5.16, 5.17, 5.18, 5.19 e 5.20.

Então se toma essas linhas como se fosse à primeira linha da matriz. Nela, são aplicadas as fórmulas de Leal as equações (14) e (15) que serão utilizadas no cálculo do vetor prioridade, resultando as Tabelas 5.21, 5.22, 5.23, 5.24, 5.25, 5.26 e 5.27, respectivamente.

Tabela 5.14 – Matriz de comparação entre alternativas em relação ao DEC

		DEC				
	9201	9202	9203	9204	PML(s)	Somatório
9201	1	4,717694	0,928318	5,943922	0,443193	12,5899337
9202						
9203						
9204						

Tabela 5.15 - Matriz de comparação entre alternativas em relação ao FEC

		FEC				
	9201	9202	9203	9204	PML(s)	Somatório
9201	1	3,979057	1,587401	5,192494	0,47646	11,75895236
9202						
9203						
9204						

Tabela 5.16 - Matriz de comparação entre alternativas em relação ao Carregamento

		Carregamento				
	9201	9202	9203	9204	PML(s)	Somatório
9201	1	1,817121	1	2,080084	0,332848	5,897204416
9202						
9203						
9204						

Tabela 5.17 - Matriz de comparação entre alternativas em relação ao N° Clientes

		N° Clientes				
	9201	9202	9203	9204	PML(s)	Somatório
9201	1	4,717694	3,556893	5,277632	0,586032	14,55221937
9202						
9203						
9204						

Tabela 5.18 - Matriz de comparação entre alternativas em relação às Perdas de Distrib.

		Perdas de Distrib.				
	9201	9202	9203	9204	PML(s)	Somatório
9201						
9202	0,693361	1	2,080084	2,620741	0,328886	6,394186492
9203						
9204						

Tabela 5.19 - Matriz de comparação entre alternativas em relação a Descargas Atmosféricas

		Descargas Atmosféricas				
	9201	9202	9203	9204	PML(s)	Somatório
9201	1	3	2,154435	1,259921	0,393709	7,41435574
9202						
9203						
9204						

Tabela 5.20 - Matriz de comparação entre alternativas em relação ao Nível de Tensão

		Nível de Tensão				
	9201	9202	9203	9204	PML(s)	Somatório
9201	1	1,44225	1,817121	2,714418	0,377857	6,97378778
9202						
9203						
9204						

O maior DEC é do Al 9203, indicando que a permissionária está levando mais tempo neste alimentador para sanar as irregularidades.

Tabela 5.21- Vetor prioridade média local solução simplificada.

DEC	
Pr 9201	0,406930118
Pr 9202	0,08625615
Pr 9203	0,438352181
Pr 9204	0,068461551

O maior FEC é do AL 9201, indicando que o alimentador está com maior numero de irregularidades.

Tabela 5.22 - Vetor Prioridade média local solução simplificada.

FEC	
Pr 9201	0,482192157
Pr 9202	0,121182514
Pr 9203	0,303762025
Pr 9204	0,092863304

Os maiores carregamentos são dos AL's 9201 e 9203 que exige atenção nas manobras.

Tabela 5.23 – Vetor Prioridade média local solução simplificada.

Carregamento	
Pr 9201	0,329916382
Pr 9202	0,181559982
Pr 9203	0,329916382
Pr 9204	0,158607253

O maior número de clientes está no AI 9201

Tabela 5.24 - Vetor Prioridade média local solução simplificada.

Nº de Clientes	
Pr 9201	0,594321459
Pr 9202	0,125977111
Pr 9203	0,167090044
Pr 9204	0,112611385

O AI 9201 é o de maior perda.

Tabela 5.25 - Vetor Prioridade média local solução simplificada.

Perdas de dist.	
Pr 9201	0,436440809
Pr 9202	0,302611155
Pr 9203	0,14548027
Pr 9204	0,115467766

O AL 9201 é o de maior índice de irregularidades por descarga atmosférica.

Tabela 5.26 - Vetor Prioridade média local solução simplificada.

	Desc. Atm.
Pr 9201	0,385922662
Pr 9202	0,128640887
Pr 9203	0,179129432
Pr 9204	0,30630702

O AL 9201 é o AL de maior queda de tensão

Tabela 5.27 - Vetor Prioridade média local solução simplificada.

	Nível de tensão
Pr 9201	0,382835841
Pr 9202	0,265443547
Pr 9203	0,210682683
Pr 9204	0,14103793

As prioridades finais são sintetizadas conforme Tabela 5.28 calculado pela Equação (13) como na solução exata:

Tabela 5.28 - Prioridades Finais Simplificadas

PG 9201	0,44275874
PG 9202	0,179003867
PG 9203	0,225457844
PG 9204	0,152779549

5.2.4 Análise da comparação entre as soluções exata e aproximada:

Para a comparação entre critérios:

Nota-se que a ordenação alterou, sem variação numérica significativa, Tabela 5.29.

O vetor prioridade nos mostra que o “nível de tensão” permaneceu como o critério mais importante para ambas às soluções.

A ordenação dos alimentadores tanto para a solução exata como para a solução aproximada permanece a mesma para o critério mais importante, mostrando que a solução aproximada pode ser usada simplificando o processo.

Tabela 5.29 - Comparações entre Critérios

Critério	Solução Exata	Ordenação	Solução Aproximada	Ordenação
DEC	0,127164	4	0,086539088	5
FEC	0,125256	5	0,089632556	4
Carregamento	0,053267	7	0,065245924	6
Nº Clientes	0,155083	2	0,223137921	2
Perdas dist	0,112081	6	0,086539088	5
Desc. Atm.	0,150057	3	0,180008557	3
Nível tensão	0,277092	1	0,268897067	1

Para as comparações entre alternativas em relação ao critério DEC; as duas soluções apresentam resultados pouco diferente, modificando a ordenação dos ALS 9201 e 9203, Tabela 5.30.

Tabela 5.30 - Comparações entre Alternativas em relação ao critério DEC

Alimentadores	Solução Exata	Ordenação	Solução Aproximada	Ordenação
9201	0,443193	1	0,406930118	2
9202	0,17252	3	0,08625615	3
9203	0,319518	2	0,438352181	1
9204	0,064768	4	0.068461551	4

A ordenação permanece nas comparações entre alternativas em relação ao critério FEC; pouca diferença de valores, Tabela 5.31.

Tabela 5.31 - Comparações entre Alternativas em relação ao critério FEC

Alimentadores	Solução Exata	Ordenação	Solução Aproximada	Ordenação
9201	0,47646	1	0,482192157	1
9202	0,177299	3	0,121182514	3
9203	0,276188	2	0,303762025	2
9204	0,070053	4	0,092863304	4

Ainda que os alimentadores 9201 e 9203 tenham tido a mesma prioridade na solução aproximada, o alimentador 9201 continua sendo o mais importante para o critério carregamen

Tabela 5.32 - Comparações entre Alternativas em relação ao critério Carregamento

Alimentadores	Solução Exata	Ordenação	Solução Aproximada	Ordenação
9201	0,332848	1	0,329916382	1
9202	0,239564	3	0,181559982	2
9203	0,286075	2	0,329916382	1
9204	0,141513	4	0,158607253	3

Novamente, a ordenação permanece nas comparações entre alternativas em relação ao critério N° de clientes, muito pouca diferença de valores, Tabela 5.33.

Tabela 5.33 - Comparações entre Alternativas em relação ao critério N° de clientes

Alimentadores	Solução exata	Ordenação	Solução aproximada	Ordenação
9201	0,586032	1	0,594321459	1
9202	0,152306	3	0,125977111	3
9203	0,172858	2	0,167090044	2
9204	0,088804	4	0,112611385	4

Os alimentadores 9201 e 9202 trocaram de ordem nas comparações entre alternativas em relação ao critério perdas de distribuição, Tabela 5.34, mas o alimentador 9201 continua sendo o mais importante nas duas soluções.

Tabela 5.34 - Comparações entre Alternativas em relação ao critério perdas de distribuição

Alimentadores	Solução Exata	Ordenação	Solução Aproximada	Ordenação
9201	0,298281	2	0,436440809	1
9202	0,328886	1	0,302611155	2
9203	0,248869	3	0,14548027	3
9204	0,123963	4	0,115467766	4

Novamente, a ordenação permanece nas comparações entre alternativas em relação ao critério descarga atmosféricas; muito pouca diferença de valores, Tabela 5.35.

Tabela 5.35 - Comparações entre Alternativas em relação ao critério descarga atmosféricas

Alimentadores	Solução Exata	Ordenação	Solução Aproximada	Ordenação
9201	0,393709	1	0,385922662	1
9202	0,13819	4	0,128640887	4
9203	0,223681	3	0,179129432	3
9204	0,244419	2	0,30630702	2

Por último, para o critério mais importante, nível de tensão a ordenação permanece, Tabela 5.36.

Tabela 5.36 - Comparações entre Alternativas em relação ao critério nível de tensão

Alimentadores	Solução Exata	Ordenação	Solução Aproximada	Ordenação
9201	0,377857	1	0,382835841	1
9202	0,28449	2	0,265443547	2
9203	0,211256	3	0,210682683	3
9204	0,126397	4	0,14103793	4

As prioridades finais do problema são sintetizadas para as duas soluções Tabela 5.37:

Tabela 5.37 - Comparação das prioridades Globais

Alimentadores	Solução Exata	Ordenação	Solução Aproximada	Ordenação
9201	0,421862813	1	0,44275874	1
9202	0,216955335	3	0,179003867	3
9203	0,237266878	2	0,225457844	2
9204	0,123914974	4	0,152779549	4

Nota-se que nas duas soluções o critério mais importante, nível de tensão, não se alterou, e que a ordenação dos alimentadores para esse critério também se manteve. Já o alimentador mais importante teve alteração na ordenação para o critério DEC e para o critério Perdas de distribuição, não se alterando na solução final. As prioridades finais também não apresentam diferença na ordenação, Tabela 5.37. As soluções são bem semelhantes, apenas não sendo iguais porque este método supõe consistência absoluta, significando que a matriz considerada não era exatamente a mesma.

5.2.5 Análise e avaliação dos critérios e soluções

O vetor prioridade nos mostra, Tabela 5.1, o “nível de tensão” como o critério mais importante conforme linha sete da matriz, pois a linha de maior prioridade é a que tem maior soma dos valores de seus elementos e confirmado pelo cálculo exato dos vetores de prioridades.

Os vetores prioridade global na Figura 5.3, nos mostra que a melhor alternativa para iniciarmos as atividades de manutenção é o “AL 9201” com 42,18%, seguido do AL 9203 com 23,72%, AL 9202 com 21,69% e AL 9204 com 12,39% respectivamente. A melhor alternativa, o alimentador 9201 foi a mais equilibrada, atingindo boas pontuações em todos os critérios, mesmo não tendo a maior pontuação no critério perdas de distribuição, Tabela 5.11. Para este critério a alternativa mais importante foi o alimentador 9202. Igualmente como calculado na matriz de comparação dos critérios, a linha de maior prioridade é a que tem maior soma dos valores de seus elementos e confirmado pelo cálculo exato do vetor de prioridades global.

As metas de DEC e FEC implantadas pela ANEEL acarretam em multas para as empresas sempre que ultrapassadas. No entanto, o planejamento da manutenção com auxílio do método AHP terá como conseqüências a redução desses índices.

A queda de tensão e o carregamento estão dentro dos limites máximos informados pela empresa, 10% e 67% respectivamente. Deve haver cuidados com o aumento desses índices, pois podem gerar conseqüências como queimas de equipamentos e aquecimento dos cabos da rede de distribuição.

É importante ressaltar que a manutenção deve ser planejada em todos os alimentadores do sistema de distribuição, sendo que o método AHP somente indicará qual o alimentador em estado mais crítico.

Assim, encerrada a fase analítica, pôde-se dar continuidade às próximas fases da sistemática proposta.

5.2.6 Implementação

O ranking de alimentadores prioritários serão repassado para os gestores da empresa que definirão como ocorrerá o processo de implementação. O próximo passo é verificar as ações a serem adotadas, ficando como sugestão de continuidade do trabalho, visto que provavelmente necessite de um método de otimização.

Para exemplificar, é interessante analisar as ocorrências que mais afetaram descontinuidade do alimentador mais crítico, conforme aplicação do método AHP, o AL 9201, e mostrado na Tabela 5.38, associando inspeção e a manutenção a ser realizada.

Tabela 5.38 – Causas de desligamentos

Causas	Nº de ocorrências	%	Causas associadas Manutenção Preventiva
Pássaros	85	13	Objeto estranho na rede
Descargas Atmosféricas	201	32	Faltam de pára-raios e problemas de aterramentos
Falha Equipamentos Programadas	57	9	Falha de equipamentos e materiais
Causas Desconhecidas	86	14	-
Outros	120	19	Causas ignoradas devem ser investigadas
Vegetação	14	2	Idem a anterior
Ventos	20	3	Vegetação
Tensão	25	4	-
Cliente isolado	11	2	Rede desregulada - dilatação
Acidentes Terceiros	12	2	-
	2	0	-
Total: 633			

Fonte: COPREL (dados agosto de 2009 a julho 2010) e ANEEL

Causas associadas com manutenção preventiva são aquelas que poderiam ter sido evitadas pela ação da manutenção preventiva, ANEEL (2010) tais como: vegetação, poluição, falha de equipamentos e materiais, objeto estranho na rede, rede desregulada, descarga

atmosférica (devido à falta de pára-raios e problemas de aterramento). As causas ignoradas também deverão ser consideradas, pois será objeto de pesquisa por parte da área técnica para identificação e providências cabíveis.

Baseado no exemplo e analisando a Tabela 5.38 verifica-se a necessidade imediata de implementação da manutenção no AL 9201 inspecionando os pára-raios e aterramentos. O padrão de estruturas também deve ser analisado. As causas ignoradas devem ser investigadas, bem como a incidência de pássaros na rede.

Tabela 5.39 – Critérios x Ações de Manutenção Preventiva

Critérios	Ações Associadas à Manutenção Preventiva
DEC	Objeto estranho na rede Faltam de para-raios e problemas de aterramentos Falha de equipamentos e materiais Causas ignoradas devem ser investigadas Vegetação Rede desregulada - dilatação Poluição
Descargas Atmosféricas	Falta de para-raios e problemas de aterramentos Falha de equipamentos e materiais Causas ignoradas devem ser investigadas
FEC	Objeto estranho na rede Falta de para-raios e problemas de aterramentos Falha de equipamentos e materiais Causas ignoradas devem ser investigadas Vegetação Rede desregulada - dilatação Poluição
Nível de Tensão	Objeto estranho na rede Falta de para-raios e problemas de aterramentos Falha de equipamentos e materiais Causas ignoradas devem ser investigadas Vegetação Rede desregulada - dilatação
Carregamento	Objeto estranho na rede Falta de para-raios e problemas de aterramentos Falha de equipamentos e materiais Causas ignoradas devem ser investigadas Vegetação Rede desregulada - dilatação
Nº de clientes	Objeto estranho na rede Falta de para-raios e problemas de aterramentos Falha de equipamentos e materiais Causas ignoradas devem ser investigadas Vegetação Rede desregulada - dilatação Poluição

Perdas de Técnicas	Falta de para-raios e problemas de aterramentos Falha de equipamentos e materiais Causas ignoradas devem ser investigadas Rede desregulada - dilatação
Nível de Tensão	Objeto estranho na rede Falta de para-raios e problemas de aterramentos Falha de equipamentos e materiais Causas ignoradas devem ser investigadas Vegetação Rede desregulada - dilatação

Analisando a Tabela 5.39 verifica - se a importância dos critérios escolhidos para a hierarquização dos alimentadores. Na realização das ações de manutenção de forma hierárquica, a qualidade do serviço e da energia fornecida aos clientes dos alimentadores envolvidos no estudo atenderá suas expectativas e atingirá os indicadores exigidos pelo órgão regulador, ANEEL.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho inicia mostrando o modelo da manutenção do setor elétrico brasileiro exaurido segundo diagnóstico apresentado pela CIGRÈ – Comitê Brasil (CE-34), em 1996, sobre a realidade em que se encontrava a manutenção dos sistemas das grandes concessionárias do setor elétrico.

Com a descontinuidade do abastecimento de energia as áreas de manutenção passam a enfrentar grandes desafios, principalmente pela falta de recursos, obrigando as concessionárias a reavaliação de custo/benefício das atividades de manutenção.

Sabe - se que o sistema de distribuição das concessionárias brasileiras é o maior responsável pela falta de fornecimento de energia aos consumidores finais.

Para contribuir na reversão deste cenário, buscou-se traçar a priorização automática dos alimentadores, para manutenção mais eficaz, em um sistema piloto de distribuição de energia elétrica de uma permissionária. Essa proposta foi alcançada, na aplicação da metodologia AHP, considerando vários critérios a partir de uma análise multicriterial, fundamentando a aplicação do método adequadamente.

No estudo de caso, o ranking dos alimentadores foi obtido na solução exata, Tabela 5.11 e na solução aproximada, Tabela 5.29. Na comparação das soluções, primeiramente referente aos os critérios, nota-se que a ordenação dos alimentadores alterou, sem variação numérica significativa, Tabela 5.30, mas o critério mais importante, nível de tensão, permaneceu para ambas as soluções. Referente às alternativas verifica-se que a ordenação dos alimentadores permaneceu a mesma para ambas as soluções, Tabela 5.38 e para o critério mais importante também, Tabela 5.37, sem variação numérica significativa.

Na comparação das soluções, verificou-se que a solução aproximada é uma ótima alternativa para facilitar não só os cálculos como o trabalho inicial dos tomadores de decisão.

O que se propõe para a utilização prática em problemas originais daqui em diante é que se tenha em mente pelo menos qual é o elemento mais importante de todos em cada comparação e que se compare esse elemento com os outros, gerando a primeira e única linha da matriz. A essa linha, aplicam-se as fórmulas utilizando adaptação de Leal (2008), que é o método simplificado.

Adicionalmente, durante a análise multicriterial, a metodologia proposta permitiu considerar a opinião de especialistas da empresa de energia elétrica para o auxílio na tomada

de decisão ou até integralizar a opinião de diversos deles em única resposta. Foi possível, priorizar as soluções possíveis encontradas em função de critérios pré-estabelecidos e de acordo com o nível de importância de cada critério, baseado na experiência desses especialistas.

Finalmente é necessário esclarecer que essa metodologia tem como objetivo apresentar a possibilidade de soluções do problema de priorização de alimentadores para o planejamento de ações de manutenção utilizando um facilitador de apoio à tomada de decisão multicritério. Este facilitador representa um assunto de grande importância para as empresas de distribuição de energia, pois permitem várias soluções. Assim, uma metodologia que aponte a melhor solução na priorização de alimentadores para executar as ações de manutenção, representa um benefício de grande importância para empresa de distribuição de energia e conseqüentemente para o setor elétrico como um todo.

Ainda, o resultado obtido na avaliação da hierarquização de alimentadores através de critérios quantitativos e qualitativos determina todas 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.

A metodologia exposta anteriormente serve de base para a seleção e classificação de todos os alimentadores do sistema de distribuição a ser analisado. A partir da utilização dessa metodologia, tem-se a lista de quais, de fato, são os alimentadores mais relevantes para receberem ações e recursos de manutenção em um período qualquer. Os seus resultados servirão de base para contemplar, também a nível estratégico, a alocação de recursos adequados às necessidades de manutenção preventiva das redes de distribuição.

Com essa metodologia quer-se evitar a falta de fornecimento de energia de maneira hierarquizada nos alimentador da SE Cruz Alta, ou ainda torná-la o mais breve possível, a baixo custo, contribuindo com principal missão das empresas de distribuição em proporcionar ao cliente um fornecimento de energia contínuo e de qualidade, alcançando a nível desejado a satisfação dos mesmos.

Para reforçar isto, enquanto se escreve essa pesquisa, os meios de comunicação informam os apagões que estão acontecendo por conta da falta de manutenção eficaz deixando milhões de clientes sem energia elétrica no nordeste e sudeste do país (JORNAL NACIONAL, 2011).

A metodologia descrita é um instrumento motivador do aprimoramento das técnicas e procedimentos da manutenção, na medida em que sistematiza a identificação de problemas e a busca de novas soluções para a melhoria do desempenho do sistema de distribuição.

É sabido que a grande necessidade dos projetos nas atividades de manutenção é definir a ordenação de prioridades das alternativas, ou planos de ações. Portanto, acreditam-se que o método proposto atende a esse requisito de maneira eficiente e com a praticidade exigida pelo usuário, principalmente os de nível gerencial.

6.1 Contribuições

O autor acredita serem originais as seguintes contribuições:

- 1) Metodologia para hierarquização de alimentadores considerando os diversos critérios dos sistemas avaliados;
- 2) Definição de critérios de priorização;
- 3) Análise da redução dos indicadores de continuidade, comparando a topologia existente e a topologia com a priorização de ações de manutenção propostos;
- 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 a intenção de obter uma avaliação final.

6.2 Artigos Publicados ou Aceitos

Artigos publicados ou aceitos em congressos nacionais e internacionais:

- 1) FERRET, R.; ABAIDE, A. R.; SOARES, B.N.; VARGAS, E.L. Qualidade no Fornecimento de Energia através do Planejamento da Manutenção IX CBQEE - Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica. 2011.

- 2) FERRET, R.; ABAIDE, A. R.; SOARES, B.N.; VARGAS, E.L. Qualidade no Fornecimento de Energia através do Planejamento da Manutenção. IX CLAGTEE – Congresso Latino Americano de Geração e Transmissão de Energia Elétrica. 2011.
- 3) FERRET, R.; ABAIDE, A. R.; SOARES, B.N.; VARGAS, E.L. Priorização Automática das Atividades de Manutenção usando Ferramentas de Apoio à Decisão Multicriterial. 26° CBM - Congresso Brasileiro de Manutenção, 2011.
- 4) FERRET, R.; ABAIDE, A. R.; SOARES, B.N.; VARGAS, E.L. Eficiência energética através do planejamento das atividades de manutenção preventiva. CBEE – Congresso Brasileiro de Eficiência Energética, 2011.

6.3 Sugestões para Trabalhos Futuros

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

- 1) Realizar a análise da viabilidade econômica da hierarquização proposta, de maneira a determinar uma relação custo benefício e assim priorizar a hierarquização também em função da relação ou agregar ao algoritmo uma função objetivo considerando os custos de cada alimentador hierarquizado;
- 2) Aprofundar a análise na aplicação do método AHP para maiores número de alternativas (alimentadores) usando o modelo simplificado;
- 3) Para definição dos tipos de atividades a serem realizadas e o trechos do alimentador para realização da manutenção, devam ser desenvolvida outra metodologia;
- 4) Integrar o método as três metodologias de manutenção existentes, manutenção programada, manutenção preditiva e manutenção centrada em confiabilidade;
- 5) Utilização de critérios de natureza qualitativa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS DISTRIBUIDORAS DE ENERGIA ELÉTRICA – ABRADEE. 2002.

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. **Procedimentos da Distribuição- PRODIST**. 2010. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=82&idPerfil=2>> Acesso em: fevereiro 2011.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, Revisão 1, vigente a partir de 01/01/2010.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL
http://www.aneel.gov.br/area.cfm?id_area=79

BANA, Carlos; COSTA, A. Introdução geral às abordagens multicritério de apoio à tomada de decisão. **Investigação Operacional**, v. 66, p.117-139, jun. 1988.

BANA; C.; COSTA, Carlos A.; VANSNICK, Jean-Claude. A critical analysis of the eigenvalue method used to derive priorities in AHP. **European Journal of operational Research**, v. 187, n. 3, June 2008, p. 1422-1428.

BORNIA, Antonio Cezar; WERNKE, Rodney. A contabilidade gerencial e os métodos multicriteriais. *Revista Contabilidade & Finanças*. FIPECAPI – FEA – USP. v.14, n. 25, p. 60-71, jan./abr. 2001.

BERNARDON, D. P. *et al.* **Distribution Network Reconfiguration Starting from Fuzzy Multicriterial Decision Making Algorithms**. Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference. CERMA, 2009.

BORGERT, Altair. **Construção de um sistema de gestão de produtos à luz de uma metodologia construtivista multicritério**. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

BORGERT, Altair. O processo de avaliação em gestão contábil multicritério: a construção da função de valor. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CUSTOS, 7, 2000, Recife. **Anais...** Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2000.

COLIN, Emerson Carlos. **Pesquisa Operacional**: 170 aplicações em estratégia, finanças, logística, produção, marketing e vendas. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

CANHA, L. N. **Metodologia para localização e dimensionamento de pequenas fontes de geração distribuída em redes de distribuição a partir de uma análise multicriterial**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Maria, 2004.

CHAN, YEE-CHING, Lilian; LYNN, Bernadette Eleanor. Performance evaluation and the Analytic Hierarchy Process. 1991. In: BRAGA, Roberto. Avaliação da liquidez das empresas através a análise da demonstração dos fluxos de caixa. **Revista Contabilidade & Finanças FIPECAFI - FEA - USP**, São Paulo, FIPECAFI, v.14, n. 25, p. 60 - 71 jan./abr. 2001.

CASAROTTO FILHO, Nelson; KOPITTKE, Bruno Hartmut. **Análise de investimentos**. São Paulo: Atlas, 1998.

COSTA, Helder Gomes. **Introdução ao método de análise hierárquica**: análise multicritério no auxílio à decisão. Niterói: H.G.C. 2002.

COSTA, Helder Gomes. **Auxílio multicritério à decisão**: método AHP. Rio de Janeiro: Abepro, 2006.

DIEHL, Carlos Alberto. Custos intangíveis: uma proposta de avaliação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CUSTOS, 6, 1999. São Paulo, **Anais...** São Paulo: FIPECAFI, 1999. CD-ROOM.

Daza, E.F.B. **Análise multicritério aplicada à priorização automática das atividades de manutenção em sistemas de distribuição de energia elétrica** Trabalha de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Santa Maria. 2006.

ELETROBRÁS Comitê de Distribuição (CODI), E39m **Manutenção e Operação de Sistemas de Distribuição**/Centrais Elétricas Brasileiras. Rio de Janeiro: Campus: ELETROBRÁS, 1982. (Coleção Distribuição de Energia Elétrica; V. 4).

FREITAS, André L. P.; COSTA, H. Gomes. **A classificação da qualidade de serviços com múltiplos avaliadores**: um experimento utilizando o método Electre TRI. Campos: Laboratório de Engenharia de Produção/CCT/UENF, 2001.

GUGLIELMETTI, Fernando Ribeiro; MARTINS, Fernando Augusto Silva; SALOMON, Valério Antônio Pamplona. Comparação Teórica entre os métodos de auxílio à tomada de decisão por múltiplos critérios. Anais. In. XXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP). Ouro Preto/MG, 2003,

GOMES, Luiz F. A. M.; FREITAS Jr., Antonio A. A importância do apoio multicritério à decisão na formação do administrador. **Revista ANGRAD**, Rio de Janeiro, v.1, n.1, jul./set. 2000.

GOMES, Luiz Flávio Autran Monteiro; ARAYA, Marcela Cecília González; CARIGNANO, Cláudia. Tomada de decisões em cenários complexos: Introdução aos métodos discretos de apoio multicritério a decisão. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004.

GOMES, Luiz Flávio Autran Monteiro. Teoria da Decisão. Coleção debate em administração. Teoria da Decisão. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

HARKER.P.T; VARGAS, Luis G. The Theory of Ratio Scale Estation: Saaty's Analytic Hierarchy Process. Management Science, 1987.

JORNAL NACIONAL. 2009. **Após apagão em parte do país**. Disponível em: < <http://g1.globo.com/Noticias/Brasil/0,,MUL1374288-5598,00-APOS+APAGAO+ITAIPU+DIZ+QUE+OPERA+EM+CONDICOES+NORMAIS.html>>. Acesso em: 23 de agosto de 2011.

KARDEC, A.; NASCIF, Julio; BARONI, Tarcisio. **Gestão estratégica e técnicas preditivas**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2003.

LAMY, Sergio Luiz. Relatório Especial Prévio. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. 16, Campinas. **Anais...** Campinas, SP, SNPTEE, 2001.

LEAL, J. E. **Método AHP**: análise do método simplificado de cálculo. Memorando Técnico do Departamento de Engenharia Industrial (DEI). Rio de Janeiro: DEI 2008.

LIBERATORE, M. J.; NYDICK, R. L. Group Decision Marking in Higher Education Using the Analytic Hierarchy process. **Research in Higher Education**. vol. 38, n. pg. 593-614, out. 1997. Disponível em: < Figura 4.2 - Alimentadores SE Cruz Alta - Fonte: COPREL (2010) <http://www.ingentaconnect.com/content/klu/rihe/1997/00000038/00000005/00415954>>. Acesso em: 23 de julho de 2011.

MARINS, C. S.; SOUZA, Daniela de Oliveira; FREITAS, André Luis Policani. **A Metodologia de multicritério como ferramenta para a tomada de decisões gerenciais: um estudo de caso.** Rio De Janeiro: GEPROS, 2006.

PAMPLONA, Edson de Oliveira. Avaliação qualitativa de cost drivers pelo método AHP. In: Congresso Brasileiro de Custos, 6, 1999. São Paulo, **Anais...** São Paulo: FIPECAFI, 1999. CD-ROOM.

RABBANI, S. J. R.; RABBANI, S. R. **Decisions in Transportation with the Analytic hierachy Process.** Campina Grande, PB: Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Engenharia Civil, 1996.

REIS, Alexandre Paulo. **Otimização baseada em confiabilidade de planos de manutenção de sistemas de distribuição de energia elétrica.** Campinas, SP: Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, 2007.

RIBEIRO, Alcimar das Chagas; COSTA, Helder Gomes. Emprego do método de análise hierárquica (AHP) na distribuição de custos indiretos: uma proposta para a pequena e média empresa. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 19, 1999, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1999 CD-ROOM.

ROCHE, H.; VEJO C. **Analisis multicriterio em La toma de decisiones.** Métodos Cuantitativos aplicados à la administración. Analisis multicritério- AHP. Material apoyo. [\[s.l.\]: AHP, 2004.](#)

Raposo, J.L.O. **Manutenção Centrada na Confiabilidade aplicada a sistemas elétricos: Uma proposta para uso de análise de risco no diagrama de decisão.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Bahia. Bahia. 2004.

SAATY, T. L. Decision-making with the AHP: Why is the principal eigenvector necessary. **European Journal of Operational Research.** v. 145, n. 1, pg. 85-91, fev. 2003. Disponível em:<<http://www.ingentaconnect.com/content/els/03772217/2003/00000145/00000001/art00227>>, Acesso em: 23 de maio de 2011.

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. **Método de Análise Hierárquico.** São Paulo: Makron Books, 1991.

SAATY, T.; NIEMIRA, M. A Framework for Making a Better Decision: How to Make More Effective Site Selection, Store Closing and Other Real Estate Decisions. **Research Review**, v. 13, n. 1, 2006. Disponível em: <http://www.who.int/immunization/sage/2_Framework_Better_decision_Saaty.pdf>. Acesso em: 21 de agosto de 2011.

SAATY, T.L.; OZDEMIR, M. S. Why the Magic Number Seven Plus or Minus Two. **Mathematical and Computer Modelling**. v. 38, p. 233-244, 2003.

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

SAATY, T. L.; VARGAS, L. G. **Dispersion of Group Judgments**. ISAHP 2005 – VIII International Symposium on the Analytic Hierarchy Process, Honolulu, Hawaii, 2005.

SHIMIZU, T. Decisão nas Organizações: introdução aos problemas de decisão encontrados nas organizações e nos sistemas de apoio à decisão. São Paulo. Ed. Atlas. 2006.

SATO, Y. Questionnaire Design for Survey Research: Employing Weighting Method. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE ANALYTIC HIERARCHY . 8. 2005. Honolulu, Hawaii. **Anais...** Honolulu, Hawaii : HISAHP, 2005.

SCHNIEDERJANS, Marc J. e GARVIN, Tim. Using the analytic hierarchy process and multi-objective programming for the selection of cost drivers in activity-based costing. *European Journal of Operational Research*, Amsterdam, v. 100, n.1, p.72-80, jul. 1997.

TSAO, T.; CHANG, H. C. Composite reliability evaluation model for different types of distribution systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 18, n. 2, 2003, p. 924-930. Disponível em: < >. Acesso em: 23 de maio de 2011.

TREVIZANO, Waldir Andrade; FREITAS, André Luiz Policani. Emprego do Método da Análise Hierárquica (A.H.P.) na seleção de Processadores. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 25, 2005. Porto Alegre, RS. **Anais...** Porto Alegre, RS. [UFRGS], 2005.

YOSHITAKE, Mariano. O processo de avaliação em gestão contábil multicritério: a construção da função de valor. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CUSTOS, 7, 2000, Recife. **Anais...** Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2000 a.

YOSHITAKE, Mariano. Análise de decisões em custos com o uso da metodologia de análise hierárquica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CUSTOS. 7, 2000b. Recife. **Anais...** Recife: UFPE, 2000b. CD-ROOM.

WIND, Y.; SAATY, T. L. Marketing Applications of the Analytic Hierarchy Process. **Management Science**, v. 26, n. 7, p. 641-658, July 1980. Disponível em: < <http://mansci.journal.informs.org/content/26/7/641.abstract>>. Acesso em: 23 de setembro de 2011.

WINSTON, W. L. SAATY, T. L. **Operations Research: Applications and Algorithms**. 3rd ed. Belmont, Ca: Duxbury Press, 1994.

ZADEH, L. A. **Fuzzy Sets**. Information and Control. v. 8, 1965. Disponível em: < <http://www-bisc.cs.berkeley.edu/Zadeh-1965.pdf>.. Acesso em: 23 de setembro de 2011.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Exemplo de Cálculos das Soluções

I Considerando as matrizes de comparações julgadas pelo especialista da área de planejamento, segundo a tabela da escala numérica de Saaty temos:

a) Engenheiro da área de Planejamento do Sistema.

Tabela
1 DEC

	9201	9202	9203	9204	PML(s)
9201	1	5	0,2	5	0,255673
9202	0,2	1	0,2	3	0,106776
9203	5	5	1	8	0,587188
9204	0,2	0,333333	0,125	1	0,050363
					$\lambda_{\max} = 4,598068$

Tabela
2 FEC

	9201	9202	9203	9204	PML(s)
9201	1	3	1	5	0,380043
9202	0,333333	1	0,333333	3	0,147514
9203	1	3	1	7	0,411293
9204	0,2	0,333333	0,142857	1	0,061149
					$\lambda_{\max} = 4,041368$

Tabela 3
Carregamento

	9201	9202	9203	9204	PML(s)
9201	1	3	1	3	0,375406
9202	0,333333	1	0,5	3	0,189841
9203	1	2	1	3	0,335933
9204	0,333333	0,333333	0,333333	1	0,09882
					$\lambda_{\max} = 4,143418$

Tabela 4 N°
Consumidores

	9201	9202	9203	9204	PML(s)
9201	1	5	5	7	0,619964
9202	0,2	1	2	3	0,182564
9203	0,2	0,5	1	3	0,134272
9204	0,142857	0,333333	0,333333	1	0,0632
					$\lambda_{\max} = 4,207773$

Tabela 5 Perdas
Técnicas

	9201	9202	9203	9204	PML(s)
9201	1	2	0,5	3	0,305602
9202	0,5	1	1	3	0,256968
9203	2	1	1	2	0,327016
9204	0,333333	0,333333	0,5	1	0,110414
					$\lambda_{\max} = 4,259778$

Tabela 6 Descargas
Atmosféricas

	9201	9202	9203	9204	PML(s)
9201	1	3	1	3	0,375
9202	0,333333	1	1	3	0,21875
9203	1	1	1	5	0,322917
9204	0,333333	0,333333	0,2	1	0,083333
					$\lambda_{\max} = 4,2$

Tabela 7 Queda de
Tensão

	9201	9202	9203	9204	PML(s)
9201	1	1	1	2	0,285714
9202	1	1	1	2	0,285714
9203	1	1	1	2	0,285714
9204	0,5	0,5	0,5	1	0,142857
					$\lambda_{\max} = 4$

Primeiramente é calculada a PML das matrizes de comparação a luz de cada critério através da normalização de cada linha da matriz de julgamento.

DEC:

$$\begin{aligned}
 & \text{PML (9201)} \\
 &= \frac{1}{1 + 0,2 + 5 + 0,2} + \frac{5}{5 + 1 + 5 + 0,33333} + \frac{0,2}{0,2 + 0,2 + 1 + 0,125} + \frac{5}{5 + 3 + 8 + 1} \\
 &= 0,255673
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{PML (9202)} \\
 &= \frac{0,2}{1 + 0,2 + 5 + 0,2} + \frac{1}{5 + 1 + 5 + 0,33333} + \frac{0,2}{0,2 + 0,2 + 1 + 0,125} + \frac{3}{5 + 3 + 8 + 1} \\
 &= 0,106776
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{PML (9203)} \\ &= \frac{5}{1 + 0,2 + 5 + 0,2} + \frac{5}{5 + 1 + 5 + 0,33333} + \frac{1}{0,2 + 0,2 + 1 + 0,125} + \frac{8}{5 + 3 + 8 + 1} \\ &= 0,587188 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{PML (9204)} \\ &= \frac{0,2}{1 + 0,2 + 5 + 0,2} + \frac{0,33333}{5 + 1 + 5 + 0,33333} + \frac{0,125}{0,2 + 0,2 + 1 + 0,125} + \frac{1}{5 + 3 + 8 + 1} \\ &= 0,050363 \end{aligned}$$

O autovalor da matriz é calculado a fim de verificar a inconsistência dos julgamentos. É calculado através da soma da multiplicação das PML's pelo somatório das linhas da matriz de julgamento.

$$\begin{aligned} \lambda_{\max} &= 0,255673 \times (1 + 0,2 + 5 + 0,2) + 0,106776 \times (5 + 1 + 5 + 0,33333) \\ &\quad + 0,587188 \times (0,2 + 0,2 + 1 + 0,125) + 0,050363 \times (5 + 3 + 8 + 1) \\ &= 4,598068 \end{aligned}$$

Assim obtemos o valor do índice de inconsistência (IC) através da fórmula:

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{4,598068 - 4}{4 - 1} = 0,199356011$$

Sendo n a dimensão da matriz.

Agora a relação de consistência é calculada dividindo o IC pelo IAM (Inconsistência Aleatória Média), dada pela seguinte tabela:

Tabela 8

Dimensão	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IAM	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Como a dimensão da nossa matriz é 4, usaremos IAM = 0,9.

$$RC = \frac{IC}{IAM} = \frac{0,199356011}{0,9} = 0,221507$$

Portanto temos a matriz inconsistente, pois o RC ultrapassou o valor máximo que é 8% para uma matriz de dimensão 4.

FEC:

PML (9201)

$$= \frac{\frac{1}{1 + 0,3333 + 1 + 0,2} + \frac{3}{3 + 1 + 3 + 0,3333} + \frac{1}{1 + 0,3333 + 1 + 0,14285} + \frac{5}{5 + 3 + 7 + 1}}{4}$$

$$= 0,380043$$

PML (9202)

$$= \frac{\frac{0,3333}{1 + 0,3333 + 1 + 0,2} + \frac{1}{3 + 1 + 3 + 0,3333} + \frac{0,3333}{1 + 0,3333 + 1 + 0,14285} + \frac{3}{5 + 3 + 7 + 1}}{4}$$

$$= 0,147514$$

PML (9203)

$$= \frac{\frac{1}{1 + 0,3333 + 1 + 0,2} + \frac{3}{3 + 1 + 3 + 0,3333} + \frac{1}{1 + 0,3333 + 1 + 0,14285} + \frac{7}{5 + 3 + 7 + 1}}{4}$$

$$= 0,411293$$

PML (9204)

$$= \frac{\frac{0,2}{1 + 0,3333 + 1 + 0,2} + \frac{0,3333}{3 + 1 + 3 + 0,3333} + \frac{0,14285}{1 + 0,3333 + 1 + 0,14285} + \frac{1}{5 + 3 + 7 + 1}}{4}$$

$$= 0,061149$$

$$\lambda_{\max} = 0,380043 \times (1 + 0,3333 + 1 + 0,2) + 0,147514 \times (3 + 1 + 3 + 0,3333)$$

$$+ 0,411293 \times (1 + 0,3333 + 1 + 0,14285) + 0,061149 \times (5 + 3 + 7 + 1)$$

$$= 4,041368$$

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{4,041368 - 4}{4 - 1} = 0,013789208$$

$$RC = \frac{IC}{IAM} = \frac{0,013789208}{0,9} = 0,015321 \quad \textbf{Consistente}$$

CARREGAMENTO:

PML (9201)

$$= \frac{\frac{1}{1 + 0,3333 + 1 + 0,3333} + \frac{3}{3 + 1 + 2 + 0,3333} + \frac{1}{1 + 0,5 + 1 + 0,3333} + \frac{3}{3 + 3 + 3 + 1}}{4}$$

$$= 0,375406$$

PML (9202)

$$= \frac{\frac{0,3333}{1 + 0,3333 + 1 + 0,3333} + \frac{1}{3 + 1 + 2 + 0,3333} + \frac{0,5}{1 + 0,5 + 1 + 0,3333} + \frac{3}{3 + 3 + 3 + 1}}{4}$$

$$= 0,189841$$

PML (9203)

$$= \frac{\frac{1}{1 + 0,3333 + 1 + 0,3333} + \frac{2}{3 + 1 + 2 + 0,3333} + \frac{1}{1 + 0,5 + 1 + 0,3333} + \frac{3}{3 + 3 + 3 + 1}}{4}$$

$$= 0,335933$$

PML (9204)

$$= \frac{\frac{0,3333}{1 + 0,3333 + 1 + 0,3333} + \frac{0,3333}{3 + 1 + 2 + 0,3333} + \frac{0,3333}{1 + 0,5 + 1 + 0,3333} + \frac{1}{3 + 3 + 3 + 1}}{4}$$

$$= 0,09882$$

$$\lambda_{\max} = 0,375406 \times (1 + 0,3333 + 1 + 0,3333) + 0,189841 \times (3 + 1 + 2 + 0,3333) + 0,335933 \times (1 + 0,5 + 1 + 0,3333) + 0,09882 \times (3 + 3 + 3 + 1)$$

$$= 4,143418$$

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{4,143418 - 4}{4 - 1} = 0,047805943$$

$$RC = \frac{IC}{IAM} = \frac{0,047805943}{0,9} = 0,053118 \quad \textbf{Consistente}$$

N° CONSUMIDORES:

PML (9201)

$$= \frac{\frac{1}{1 + 0,2 + 0,2 + 0,14285} + \frac{5}{5 + 1 + 0,5 + 0,3333} + \frac{5}{5 + 2 + 1 + 0,3333} + \frac{7}{7 + 3 + 3 + 1}}{4}$$

$$= 0,619964$$

PML (9202)

$$= \frac{\frac{0,2}{1 + 0,2 + 0,2 + 0,14285} + \frac{1}{5 + 1 + 0,5 + 0,3333} + \frac{2}{5 + 2 + 1 + 0,3333} + \frac{3}{7 + 3 + 3 + 1}}{4}$$

$$= 0,182564$$

PML (9203)

$$= \frac{\frac{0,2}{1 + 0,2 + 0,2 + 0,14285} + \frac{0,5}{5 + 1 + 0,5 + 0,3333} + \frac{1}{5 + 2 + 1 + 0,3333} + \frac{3}{7 + 3 + 3 + 1}}{4}$$

$$= 0,134272$$

PML (9204)

$$= \frac{\frac{0,14285}{1 + 0,2 + 0,2 + 0,14285} + \frac{0,3333}{5 + 1 + 0,5 + 0,3333} + \frac{0,3333}{5 + 2 + 1 + 0,3333} + \frac{1}{7 + 3 + 3 + 1}}{4}$$

$$= 0,00632$$

$$\begin{aligned}\lambda_{\max} &= 0,619964 \times (1 + 0,2 + 0,2 + 0,14285) + 0,182564 \times (5 + 1 + 0,5 + 0,3333) \\ &\quad + 0,134272 \times (5 + 2 + 1 + 0,3333) + 0,0632 \times (7 + 3 + 3 + 1) \\ &= 4,207773\end{aligned}$$

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{4,207773 - 4}{4 - 1} = 0,06925761$$

$$RC = \frac{IC}{IAM} = \frac{0,06925761}{0,9} = 0,076953 \quad \textbf{Consistente}$$

PERDAS TÉCNICAS:

PML (9201)

$$\begin{aligned}&= \frac{1}{1 + 0,5 + 2 + 0,3333} + \frac{2}{2 + 1 + 1 + 0,3333} + \frac{0,5}{0,5 + 1 + 1 + 0,5} + \frac{3}{3 + 3 + 2 + 1} \\ &= 0,305602\end{aligned}$$

PML (9202)

$$\begin{aligned}&= \frac{0,5}{1 + 0,5 + 2 + 0,3333} + \frac{1}{2 + 1 + 1 + 0,3333} + \frac{1}{0,5 + 1 + 1 + 0,5} + \frac{3}{3 + 3 + 2 + 1} \\ &= 0,256968\end{aligned}$$

PML (9203)

$$\begin{aligned}&= \frac{2}{1 + 0,5 + 2 + 0,3333} + \frac{1}{2 + 1 + 1 + 0,3333} + \frac{1}{0,5 + 1 + 1 + 0,5} + \frac{2}{3 + 3 + 2 + 1} \\ &= 0,327016\end{aligned}$$

PML (9204)

$$\begin{aligned}&= \frac{0,3333}{1 + 0,5 + 2 + 0,3333} + \frac{0,3333}{2 + 1 + 1 + 0,3333} + \frac{0,5}{0,5 + 1 + 1 + 0,5} + \frac{1}{3 + 3 + 2 + 1} \\ &= 0,110414\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\lambda_{\max} &= 0,305602 \times (1 + 0,5 + 2 + 0,3333) + 0,256968 \times (2 + 1 + 1 + 0,3333) \\ &\quad + 0,327016 \times (0,5 + 1 + 1 + 0,5) + 0,110414 \times (3 + 3 + 2 + 1) \\ &= 4,259778\end{aligned}$$

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{4,259778 - 4}{4 - 1} = 0,086592655$$

$$RC = \frac{IC}{IAM} = \frac{0,086592655}{0,9} = 0,096214 \quad \textbf{Inconsistente}$$

DESCARGAS ATMOSFÉRICAS:

$$\begin{aligned} \text{PML (9201)} &= \frac{1}{1 + 0,3333 + 1 + 0,3333} + \frac{3}{3 + 1 + 1 + 0,3333} + \frac{1}{1 + 1 + 1 + 0,2} + \frac{3}{3 + 3 + 5 + 1} \\ &= 0,375 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{PML (9202)} &= \frac{0,3333}{1 + 0,3333 + 1 + 0,3333} + \frac{1}{3 + 1 + 1 + 0,3333} + \frac{1}{1 + 1 + 1 + 0,2} + \frac{3}{3 + 3 + 5 + 1} \\ &= 0,21875 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{PML (9203)} &= \frac{1}{1 + 0,3333 + 1 + 0,3333} + \frac{1}{3 + 1 + 1 + 0,3333} + \frac{1}{1 + 1 + 1 + 0,2} + \frac{5}{3 + 3 + 5 + 1} \\ &= 0,322917 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{PML (9204)} &= \frac{0,3333}{1 + 0,3333 + 1 + 0,3333} + \frac{0,3333}{3 + 1 + 1 + 0,3333} + \frac{0,2}{1 + 1 + 1 + 0,2} + \frac{1}{3 + 3 + 5 + 1} \\ &= 0,083333 \end{aligned}$$

$$\lambda_{\max} = 0,375 \times (1 + 0,3333 + 1 + 0,3333) + 0,21875 \times (3 + 1 + 1 + 0,3333) + 0,322917 \times (1 + 1 + 1 + 0,2) + 0,083333 \times (3 + 3 + 5 + 1) = 4,2$$

$$IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{4,2 - 4}{4 - 1} = 0,066666667$$

$$RC = \frac{IC}{IAM} = \frac{0,06666666667}{0,9} = 0,074074 \quad \textbf{Consistente}$$

QUEDAS DE TENSÃO:

$$\begin{aligned} \text{PML (9201)} &= \frac{1}{1 + 1 + 1 + 0,5} + \frac{1}{1 + 1 + 1 + 0,5} + \frac{1}{1 + 1 + 1 + 0,5} + \frac{2}{2 + 2 + 2 + 1} \\ &= 0,285714 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{PML (9202)} &= \frac{1}{1 + 1 + 1 + 0,5} + \frac{1}{1 + 1 + 1 + 0,5} + \frac{1}{1 + 1 + 1 + 0,5} + \frac{2}{2 + 2 + 2 + 1} \\ &= 0,285714 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{PML (9203)} &= \frac{1}{1 + 1 + 1 + 0,5} + \frac{1}{1 + 1 + 1 + 0,5} + \frac{1}{1 + 1 + 1 + 0,5} + \frac{2}{2 + 2 + 2 + 1} \\ &= 0,285714 \end{aligned}$$

$$PML(9204) = \frac{\frac{0,5}{1+1+1+0,5} + \frac{0,5}{1+1+1+0,5} + \frac{0,5}{1+1+1+0,5} + \frac{1}{2+2+2+1}}{4}$$

$$= 0,142857$$

$$\lambda_{max} = 0,285714 \times (1+1+1+0,5) + 0,285714 \times (1+1+1+0,5) + 0,285714 \times (1+1+1+0,5) + 0,142857 \times (2+2+2+1) = 4$$

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} = \frac{4 - 4}{4 - 1} = 0$$

$$RC = \frac{IC}{IAM} = \frac{0}{0,9} = 0 \quad \textbf{Consistente}$$

A comparação dos critérios a luz do objetivo geral segue na matriz abaixo Tabela 9:

Tabela 9

Matriz normalizada de critérios									
Prioridades		DEC	FEC	Carreg.	Nº Consum.	Perdas	Desc. Atm.	Queda Tensão	Vetor de Prioridade
	DEC	1	0,333333	7	3	0,333333	1	0,2	0,089871
	FEC	3	1	7	3	0,333333	0,2	0,333333333	0,112474
	Carreg.	0,142857	0,142857	1	0,142857143	0,142857	0,14285714	0,142857143	0,021056
	Nº Consum.	0,333333	0,333333	7	1	0,2	0,14285714	0,142857143	0,050633
	Perdas	3	3	7	5	1	0,33333333	0,2	0,149075
	Desc. Atm.	1	5	7	7	3	1	0,2	0,201832
	Queda Tensão	5	3	7	7	5	5	1	0,375058

$$\begin{aligned}
 & \text{Cr(DEC)} \\
 & \left(\frac{1}{7} + \frac{3}{7} + \frac{0,142857}{7} + \frac{0,333333}{7} + \frac{3}{7} + \frac{1}{7} + \frac{5}{7} + \frac{0,3333}{7} + \frac{1}{7} + \frac{0,14285}{7} + \frac{0,3333}{7} + \frac{3}{7} + \frac{5}{7} + \frac{3}{7} \right) \\
 & + \frac{0,3333}{7} + \frac{0,3333}{7} + \frac{0,3333}{7} + \frac{0,2}{7} + \frac{0,14285}{7} + \frac{0,2}{7} + \frac{1}{7} + \frac{3}{7} + \frac{5}{7} \\
 & + \frac{1}{7} + \frac{0,2}{7} + \frac{0,14285}{7} + \frac{0,14285}{7} + \frac{0,3333}{7} + \frac{1}{7} + \frac{5}{7} + \frac{0,2}{7} + \frac{0,3333}{7} + \frac{0,14285}{7} + \frac{0,14285}{7} + \frac{0,2}{7} + \frac{0,2}{7} + \frac{1}{7} \\
 & \underline{\hspace{10em}} = 0,089871
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{Cr (FEC)} \\
 & \left(\frac{3}{7} + \frac{1}{7} + \frac{0,3333}{7} + \frac{1}{7} + \frac{0,14285}{7} + \frac{0,3333}{7} + \frac{3}{7} + \frac{5}{7} + \frac{3}{7} \right) \\
 & + \frac{0,3333}{7} + \frac{0,3333}{7} + \frac{0,14285}{7} + \frac{0,2}{7} + \frac{1}{7} + \frac{3}{7} + \frac{5}{7} \\
 & + \frac{0,2}{7} + \frac{0,3333}{7} + \frac{0,14285}{7} + \frac{0,14285}{7} + \frac{0,2}{7} + \frac{0,2}{7} + \frac{1}{7} \\
 & \underline{\hspace{10em}} = 0,112474 \text{Cr (Carreg)}
 \end{aligned}$$

$$\frac{\left(\frac{0,14285}{1+3+0,14285+0,333333+3+1+5} + \frac{0,14285}{0,3333+1+0,14285+0,3333+3+5+3} \right) + \frac{1}{7+7+1+7+7+7+7} + \frac{0,14285}{3+3+0,14285+1+5+7+7} + \frac{0,14285}{0,3333+0,3333+0,14285+0,2+1+3+5} + \frac{0,14285}{1+0,2+0,14285+0,14285+0,3333+1+5} + \frac{0,14285}{0,2+0,3333+0,14285+0,14285+0,2+0,2+1} \right)}{7} = 0,021056$$

Cr (N° Consum)

$$\frac{\left(\frac{0,3333}{1+3+0,142857+0,333333+3+1+5} + \frac{0,3333}{0,3333+1+0,14285+0,3333+3+5+3} \right) + \frac{1}{7+7+1+7+7+7+7} + \frac{1}{3+3+0,14285+1+5+7+7} + \frac{0,2}{0,3333+0,3333+0,14285+0,2+1+3+5} + \frac{0,14285}{1+0,2+0,14285+0,14285+0,3333+1+5} + \frac{0,14285}{0,2+0,3333+0,14285+0,14285+0,2+0,2+1} \right)}{7} = 0,050633$$

Cr (Perdas)

$$\frac{\left(\frac{3}{1+3+0,142857+0,333333+3+1+5} + \frac{3}{0,3333+1+0,14285+0,3333+3+5+3} \right) + \frac{5}{7+7+1+7+7+7+7} + \frac{1}{3+3+0,14285+1+5+7+7} + \frac{1}{0,3333+0,3333+0,14285+0,2+1+3+5} + \frac{0,3333}{1+0,2+0,14285+0,14285+0,3333+1+5} + \frac{0,2}{0,2+0,3333+0,14285+0,14285+0,2+0,2+1} \right)}{7} = 0,149075$$

Cr (Desc. Atm)

$$\frac{\left(\frac{1}{1 + 3 + 0,142857 + 0,333333 + 3 + 1 + 5} + \frac{5}{0,3333 + 1 + 0,14285 + 0,3333 + 3 + 5 + 3} \right) + \frac{1}{7 + 7 + 1 + 7 + 7 + 7 + 7} + \frac{3}{3 + 3 + 0,14285 + 1 + 5 + 7 + 7} + \frac{0,2}{0,3333 + 0,3333 + 0,14285 + 0,2 + 1 + 3 + 5} + \frac{1}{1 + 0,2 + 0,14285 + 0,14285 + 0,3333 + 1 + 5} + \frac{0,2}{0,2 + 0,3333 + 0,14285 + 0,14285 + 0,2 + 0,2 + 1}}{7} = 0,201832$$

Cr (Queda Tensão)

$$\frac{\left(\frac{5}{1 + 3 + 0,142857 + 0,333333 + 3 + 1 + 5} + \frac{3}{0,3333 + 1 + 0,14285 + 0,3333 + 3 + 5 + 3} \right) + \frac{5}{7 + 7 + 1 + 7 + 7 + 7 + 7} + \frac{5}{3 + 3 + 0,14285 + 1 + 5 + 7 + 7} + \frac{1}{0,3333 + 0,3333 + 0,14285 + 0,2 + 1 + 3 + 5} + \frac{5}{1 + 0,2 + 0,14285 + 0,14285 + 0,3333 + 1 + 5} + \frac{1}{0,2 + 0,3333 + 0,14285 + 0,14285 + 0,2 + 0,2 + 1}}{7} = 0,375058$$

A prioridade global é calculada através da seguinte fórmula:

$$PG(a1)=PML(Cr1)*PML(a1)Cr1+PML(Cr2)*PML(a1)Cr2+...+PML(Crn)*PML(a1)Crm$$

Então temos:

$$PG(9201) = 0,089871 \times 0,255673 + 0,112474 \times 0,380043 + 0,021056 \times 0,375406 + 0,506333 \times 0,619964 + 0,149075 \times 0,305602 \\ + 0,201832 \times 0,375 + 0,375058 \times 0,285714 = 0,333422$$

$$PG(9202) = 0,089871 \times 0,106776 + 0,112474 \times 0,0,147514 + 0,021056 \times 0,189841 + 0,506333 \times 0,182564 + 0,149075 \\ \times 0,0,256968 + 0,201832 \times 0,2185 + 0,375058 \times 0,285714 = 0,229046$$

$$PG(9203) = 0,089871 \times 0,587188 + 0,112474 \times 0,411293 + 0,021056 \times 0,335933 + 0,506333 \times 0,134272 + 0,149075 \times 0,327016 \\ + 0,201832 \times 0,322917 + 0,375058 \times 0,285714 = 0,333422$$

$$PG(9204) = 0,089871 \times 0,050363 + 0,112474 \times 0,061149 + 0,021056 \times 0,09882 + 0,506333 \times 0,0632 + 0,149075 \times 0,110414 \\ + 0,201832 \times 0,083333 + 0,375058 \times 0,142857 = 0,103543$$

b) Engenheiro da área de Manutenção - cálculo idem ao item a, só apresenta-se o resultado.

Tabela
10 DEC

	9201	9202	9203	9204	PML(s)
9201	1	7	1	7	0,471846
9202	0,142857	1	0,333333	3	0,117454
9203	1	3	1	5	0,352361
9204	0,142857	0,333333	0,2	1	0,05834
					$\lambda_{\max} = 4,235729$

Tabela
11 FEC

	9201	9202	9203	9204	PML(s)
9201	1	7	1	7	0,471846
9202	0,142857	1	0,333333	3	0,117454
9203	1	3	1	5	0,352361
9204	0,142857	0,333333	0,2	1	0,05834
					$\lambda_{\max} = 4,235729$

Tabela 12
Carregamento

	9201	9202	9203	9204	PML(s)
9201	1	1	0,5	1	0,198284
9202	1	1	1	1	0,242402
9203	2	1	1	3	0,375735
9204	1	1	0,333333	1	0,183578
					$\lambda_{\max} = 4,127083$

Tabela 13 N°
Consumidores

	9201	9202	9203	9204	PML(s)
9201	1	7	3	7	0,594538
9202	0,142857	1	0,333333	3	0,115546
9203	0,333333	3	1	3	0,22479
9204	0,142857	0,333333	0,333333	1	0,065126
					$\lambda_{\max} = 4,232893$

Tabela 14 Perdas
Técnicas

	9201	9202	9203	9204	PML(s)
9201	1	3	3	5	0,501082
9202	0,333333	1	3	3	0,262987
9203	0,333333	0,333333	1	3	0,159091
9204	0,2	0,333333	0,333333	1	0,07684
					$\lambda_{\max} = 4,251371$

Tabela 15 Descargas
Atmosféricas

	9201	9202	9203	9204	PML(s)
9201	1	3	5	0,333333	0,276018
9202	0,333333	1	0,333333	0,2	0,075415
9203	0,2	3	1	0,2	0,124434
9204	3	5	5	1	0,524133
					$\lambda_{\max} = 4,475013$

Tabela 16 Queda
de Tensão

	9201	9202	9203	9204	PML(s)
9201	1	3	3	5	0,501082
9202	0,333333	1	3	3	0,262987
9203	0,333333	0,333333	1	3	0,159091
9204	0,2	0,333333	0,333333	1	0,07684
					$\lambda_{\max} = 4,251371$

A comparação dos critérios a luz do objetivo geral segue na matriz abaixo:

Tabela 17 - Matriz normalizada de critérios, vetores prioridades

	DEC	FEC	Carreg.	Nº Consum.	Perdas	Desc. Atm.	Queda Tensão	Vetor de Priorid
DEC	1	1	3	3	3	3	0,33333333	0,180726
FEC	1	1	3	3	3	3	0,33333333	0,180726
Carreg.	0,333333	0,333333	1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,032408
Nº Consum.	0,333333	0,333333	5	1	5	3	1	0,159577
Perdas	0,333333	0,333333	5	0,2	1	0,33333333	0,33333333	0,064676
Desc. Atm.	0,333333	0,333333	5	0,33333333	3	1	3	0,152764
Queda Tensão	3	3	5	1	3	0,33333333	1	0,229123

Cálculo dos vetores prioridades:

$$PG(9201) = 0,180726 \times 0,471846 + 0,180726 \times 0,471846 + 0,032408 \times 0,198284 + 0,159577 \times 0,594538 + 0,064676 \times 0,501082 + 0,152764 \times 0,276018 + 0,229123 \times 0,501082 = 0,461233$$

$$PG(9202) = 0,180726 \times 0,117454 + 0,180726 \times 0,117454 + 0,032408 \times 0,242402 + 0,159577 \times 0,115546 + 0,064676 \times 0,262987 + 0,152764 \times 0,075415 + 0,229123 \times 0,262987 = 0,157533$$

$$PG(9203) = 0,180726 \times 0,352361 + 0,180726 \times 0,352361 + 0,032408 \times 0,375735 + 0,159577 \times 0,22479 + 0,064676 \times 0,159091 \\ + 0,152764 \times 0,124434 + 0,229123 \times 0,159091 = 0,241159$$

$$PG(9204) = 0,180726 \times 0,05834 + 0,180726 \times 0,05834 + 0,032408 \times 0,183578 + 0,159577 \times 0,065126 + 0,064676 \times 0,07684 \\ + 0,152764 \times 0,524133 + 0,229123 \times 0,07684 = 0,1400073$$

c) Engenheiro da área de Operação, cálculo idem ao item a, só se apresenta o resultado.

Tabela
18 DEC

	9201	9202	9203	9204	PML(s)
9201	1	3	4	6	0,522019
9202	0,333333	1	5	4	0,29977
9203	0,25	0,2	1	2	0,109221
9204	0,166667	0,25	0,5	1	0,06899
					$\lambda_{\max} = 4,291202$

Tabela
19 FEC

	9201	9202	9203	9204	PML(s)
9201	1	3	4	4	0,508556
9202	0,333333	1	3	4	0,279144
9203	0,25	0,333333	1	2	0,127139
9204	0,25	0,25	0,5	1	0,08516
					$\lambda_{\max} = 4,229211$

Tabela 20
Carregamento

	9201	9202	9203	9204	PML(s)
9201	1	2	2	3	0,422619
9202	0,5	1	2	2	0,270833
9203	0,5	0,5	1	1	0,162202
9204	0,333333	0,5	1	1	0,144345
					$\lambda_{\max} = 4,053075$

Tabela 21N°
Consumidores

	9201	9202	9203	9204	PML(s)
9201	1	3	3	3	0,5
9202	0,333333	1	1	1	0,166667
9203	0,333333	1	1	1	0,166667
9204	0,333333	1	1	1	0,166667
					$\lambda_{\max} = 4$

Tabela 22 Perdas
Técnicas

	9201	9202	9203	9204	PML(s)
9201	1	0,5	0,5	0,5	0,137013
9202	2	1	3	2	0,419481
9203	2	0,333333	1	2	0,248052
9204	2	0,5	0,5	1	0,195455
					$\lambda_{\max} = 4,253139$

Tabela 23 Descargas
Atmosféricas

	9201	9202	9203	9204	PML(s)
9201	1	3	2	2	0,423115
9202	0,333333	1	0,5	0,5	0,12252
9203	0,5	2	1	1	0,227183
9204	0,5	2	1	1	0,227183
					$\lambda_{\max} = 4,01207$

Tabela 24 Queda
de Tensão

	9201	9202	9203	9204	PML(s)
9201	1	1	2	2	0,338095
9202	1	1	1	2	0,288095
9203	0,5	1	1	1	0,204762
9204	0,5	0,5	1	1	0,169048
					$\lambda_{\max} = 4,060714$

A comparação dos critérios a luz do objetivo geral segue na matriz abaixo:

Tabela 25 - Matriz normalizada de critérios, vetores prioritários

	DEC	FEC	Carreg.	Nº Consum.	Perdas	Desc. Atm.	Queda Tensão	
DEC	1	3	1	0,25	0,333333	0,33333333	0,5	0,086996
FEC	0,3333333	1	0,5	0,33333333	2	0,33333333	0,33333333	0,072964
Carreg.	1	2	1	0,5	3	4	0,5	0,160664
Nº Consum.	4	3	2	1	3	3	4	0,301488
Perdas	3	0,5	0,3333	0,33333333	1	3	0,5	0,110448
Desc. Atm.	3	3	0,25	0,33333333	0,333333	1	0,5	0,10274
Queda Tensão	2	3	2	0,25	2	2	1	0,1647

$$PG(9201) = 0,086996 \times 0,522019 + 0,072964 \times 0,508556 + 0,160664 \times 0,422619 + 0,301488 \times 0,5 + 0,110448 \times 0,137013 + 0,10274 \times 0,423115 + 0,1647 \times 0,338095 = 0,415451$$

$$PG(9202) = 0,086996 \times 0,29977 + 0,072964 \times 0,279144 + 0,160664 \times 0,270833 + 0,301488 \times 0,166667 + 0,110448 \times 0,419481 + 0,10274 \times 0,12252 + 0,1647 \times 0,288095 = 0,246575$$

$$PG(9203) = 0,086996 \times 0,109221 + 0,072964 \times 0,127139 + 0,160664 \times 0,162202 + 0,301488 \times 0,166667 + 0,110448 \times 0,248052 + 0,10274 \times 0,227183 + 0,1647 \times 0,204762 = 0,179548$$

$$PG(9204) = 0,086996 \times 0,06899 + 0,072964 \times 0,08516 + 0,160664 \times 0,144345 + 0,301488 \times 0,166667 + 0,110448 \times 0,195455 + 0,10274 \times 0,227183 + 0,1647 \times 0,169048 = 0,158425$$

II Média das opiniões

O cálculo das médias das opiniões dos especialistas é realizado através da média geométrica das opiniões dos mesmos. Considerando as matrizes expostas acima, calculamos as médias geométricas:

Obs.: a diagonal principal da matriz de julgamento recebe sempre o nº 1. Abaixo da diagonal principal sempre será o inverso dos julgamentos realizados acima da mesma.

DEC

$$M(9201 - 9202) = \sqrt[3]{5 \times 7 \times 3} = 4,717694$$

$$M(9201 - 9203) = \sqrt[3]{0,2 \times 1 \times 4} = 0,928318$$

$$M(9201 - 9204) = \sqrt[3]{5 \times 7 \times 6} = 5,943922$$

$$M(9202 - 9203) = \sqrt[3]{0,2 \times 0,3333 \times 5} = 0,693361$$

$$M(9202 - 9204) = \sqrt[3]{3 \times 3 \times 4} = 3,301927$$

$$M(9203 - 9204) = \sqrt[3]{8 \times 5 \times 2} = 4,308869$$

FEC

$$M(9201 - 9202) = \sqrt[3]{3 \times 7 \times 3} = 3,979057$$

$$M(9201 - 9203) = \sqrt[3]{1 \times 1 \times 4} = 1,587401$$

$$M(9201 - 9204) = \sqrt[3]{5 \times 7 \times 4} = 5,192494$$

$$M(9202 - 9203) = \sqrt[3]{0,3333 \times 0,3333 \times 3} = 0,693361$$

$$M(9202 - 9204) = \sqrt[3]{3 \times 3 \times 4} = 3,301927$$

$$M(9203 - 9204) = \sqrt[3]{7 \times 5 \times 2} = 4,121285$$

Carregamento

$$M(9201 - 9202) = \sqrt[3]{3 \times 1 \times 2} = 1,817121$$

$$M(9201 - 9203) = \sqrt[3]{1 \times 0,5 \times 2} = 1$$

$$M(9201 - 9204) = \sqrt[3]{3 \times 1 \times 3} = 2,080084$$

$$M(9202 - 9203) = \sqrt[3]{0,5 \times 1 \times 2} = 1$$

$$M(9202 - 9204) = \sqrt[3]{3 \times 1 \times 2} = 1,817121$$

$$M(9203 - 9204) = \sqrt[3]{3 \times 3 \times 1} = 2,080084$$

Nº Consumidores

$$M(9201 - 9202) = \sqrt[3]{5 \times 7 \times 3} = 4,717694$$

$$M(9201 - 9203) = \sqrt[3]{5 \times 3 \times 3} = 3,556893$$

$$M(9201 - 9204) = \sqrt[3]{7 \times 7 \times 3} = 5,277632$$

$$M(9202 - 9203) = \sqrt[3]{2 \times 0,3333 \times 1} = 0,87358$$

$$M(9202 - 9204) = \sqrt[3]{3 \times 3 \times 1} = 2,080084$$

$$M(9203 - 9204) = \sqrt[3]{3 \times 3 \times 1} = 2,080084$$

Perdas Técnicas

$$M(9201 - 9202) = \sqrt[3]{2 \times 3 \times 0,5} = 1,44225$$

$$M(9201 - 9203) = \sqrt[3]{0,5 \times 3 \times 0,5} = 0,90856$$

$$M(9201 - 9204) = \sqrt[3]{3 \times 5 \times 0,5} = 1,957434$$

$$M(9202 - 9203) = \sqrt[3]{1 \times 3 \times 3} = 2,080084$$

$$M(9202 - 9204) = \sqrt[3]{3 \times 3 \times 2} = 2,620741$$

$$M(9203 - 9204) = \sqrt[3]{2 \times 3 \times 2} = 2,289428$$

Descargas Atmosféricas

$$M(9201 - 9202) = \sqrt[3]{3 \times 3 \times 3} = 3$$

$$M(9201 - 9203) = \sqrt[3]{1 \times 5 \times 2} = 2,154435$$

$$M(9201 - 9204) = \sqrt[3]{3 \times 0,3333 \times 2} = 1,259921$$

$$M(9202 - 9203) = \sqrt[3]{1 \times 0,3333 \times 0,5} = 0,550321$$

$$M(9202 - 9204) = \sqrt[3]{3 \times 0,2 \times 0,5} = 0,669433$$

$$M(9203 - 9204) = \sqrt[3]{5 \times 0,2 \times 1} = 1$$

Quedas de Tensão

$$M(9201 - 9202) = \sqrt[3]{1 \times 3 \times 1} = 1,44225$$

$$M(9201 - 9203) = \sqrt[3]{1 \times 3 \times 2} = 1,817121$$

$$M(9201 - 9204) = \sqrt[3]{2 \times 5 \times 2} = 2,714418$$

$$M(9202 - 9203) = \sqrt[3]{1 \times 3 \times 1} = 1,44225$$

$$M(9202 - 9204) = \sqrt[3]{2 \times 3 \times 2} = 2,289428$$

$$M(9203 - 9204) = \sqrt[3]{2 \times 3 \times 1} = 1,817121$$

III Solução exata

A partir do cálculo da média geométrica das opiniões, os cálculos restantes são iguais aos do item a, só apresenta-se os resultados.

Matrizes de avaliação, montadas a partir da média das opiniões dos especialistas.

Tabela 26

DEC	9201	9202	9203	9204	PML(s)
9201	1	4,717694	0,928318	5,943922	0,443193
9202	0,211968	1	0,693361	3,301927	0,17252
9203	1,077217	1,44225	1	4,308869	0,319518
9204	0,168239	0,302853	0,232079	1	0,064768
					$\lambda_{\max} = 4,231112$

Tabela 27

FEC	9201	9202	9203	9204	PML(s)
9201	1	3,979057	1,587401	5,192494	0,47646
9202	0,251316	1	0,693361	3,301927	0,177299
9203	0,629961	1,44225	1	4,121285	0,276188
9204	0,192586	0,302853	0,242643	1	0,070053
					$\lambda_{\max} = 4,107247$

Tabela 28

Carregamento	9201	9202	9203	9204	PML(s)
9201	1	1,817121	1	2,080084	0,332848
9202	0,550321	1	1	1,817121	0,239564
9203	1	1	1	2,080084	0,286075
9204	0,48075	0,550321	0,48075	1	0,141513
					$\lambda_{\max} = 4,038299$

Tabela 29

Nº Consum.	9201	9202	9203	9204	PML(s)
9201	1	4,717694	3,556893	5,277632	0,586032
9202	0,211968	1	0,87358	2,080084	0,152306
9203	0,281144	1,144714	1	2,080084	0,172858
9204	0,189479	0,48075	0,48075	1	0,088804
					$\lambda_{\max} = 4,053178$

Tabela 30

P. Técnicas	9201	9202	9203	9204	PML(s)
9201	1	1,44225	0,90856	1,957434	0,298281
9202	0,693361	1	2,080084	2,620741	0,328886
9203	1,100642	0,48075	1	2,289428	0,248869
9204	0,510873	0,381571	0,43679	1	0,123963
					$\lambda_{\max} = 4,149259$

Tabela 31

Desc. Atm.	9201	9202	9203	9204	PML(s)
9201	1	3	2,154435	1,259921	0,393709
9202	0,333333	1	0,550321	0,669433	0,13819
9203	0,464159	1,817121	1	1	0,223681
9204	0,793701	1,493802	1	1	0,244419
					$\lambda_{\max} = 4,04325$

Tabela 32

Queda Tensão	9201	9202	9203	9204	PML(s)
9201	1	1,44225	1,817121	2,714418	0,377857
9202	0,693361	1	1,44225	2,289428	0,28449
9203	0,550321	0,693361	1	1,817121	0,211256
9204	0,368403	0,43679	0,550321	1	0,126397
					$\lambda_{\max} = 4,007928$

A comparação dos critérios a luz do objetivo geral segue na matriz abaixo:

Tabela 33

Matriz normalizada de critérios								
Prioridades	DEC	FEC	Carreg.	Nº Consum.	Perdas	Desc. Atm.	Q. Tensão	V. Prioridade
DEC	1	1	2,758924	1,310370697	0,693361	1	0,321829795	0,127164294
FEC	1	1	2,18976	1,44224957	1,259921	0,58480355	0,333333333	0,125255554
Carreg.	0,36246	0,456671	1	0,24264275	0,440911	0,4852855	0,24264275	0,053267362
Nº Consum.	0,763143	0,693361	4,121285	1	1,44225	1,08738037	0,829826533	0,155082947
Perdas	1,44225	0,793701	2,268031	0,693361274	1	0,69336127	0,321829795	0,112080607
Desc. Atm.	1	1,709976	2,060643	0,919641392	1,44225	1	0,66943295	0,150056983
Queda Tensão	3,107233	3	4,121285	1,205071132	3,107233	1,49380158	1	0,277092254

$\lambda_{\max} =$	7,264739806
Ic=	0,044123301
Rc=	0,033426743

Tabela 34

PG(A)= 0,421862813	Alimentador 9201
PG(B)= 0,216955335	Alimentador 9202
PG(C)= 0,237266878	Alimentador 9203
PG(D)= 0,123914974	Alimentador 9204

$$PG(9201) = 0,127164294 \times 0,443193 + 0,125255554 \times 0,47646 + 0,053267362 \times 0,332848 + 0,155082947 \times 0,586032 + 0,112080607 \times 0,298281 + 0,150056983 \times 0,393709 + 0,277092254 \times 0,377857 = 0,421862813$$

$$PG(9202) = 0,127164294 \times 0,17252 + 0,125255554 \times 0,177299 + 0,053267362 \times 0,239564 + 0,155082947 \times 0,152306 + 0,112080607 \times 0,328886 + 0,150056983 \times 0,13819 + 0,277092254 \times 0,28449 = 0,216955335$$

$$PG(9203) = 0,127164294 \times 0,319518 + 0,125255554 \times 0,276188 + 0,053267362 \times 0,286075 + 0,155082947 \times 0,172858 + 0,112080607 \times 0,248869 + 0,150056983 \times 0,223681 + 0,277092254 \times 0,211256 = 0,237266878$$

$$PG(9204) = 0,127164294 \times 0,064768 + 0,125255554 \times 0,070053 + 0,053267362 \times 0,141513 + 0,155082947 \times 0,088804 + 0,112080607 \times 0,123963 + 0,150056983 \times 0,244419 + 0,277092254 \times 0,126397 = 0,123914974$$

IV Solução Simplificado ou Aproximada

O método simplificado parte das tabelas oriundas da média das opiniões dos especialistas.

Tabela 35

DEC	9201	9202	9203	9204	PML(s)	Somatório
9201	1	4,717694	0,928318	5,943922	0,443193	12,5899337
9202	0,211968	1	0,693361	3,301927	0,17252	5,20725649
9203	1,077217	1,44225	1	4,308869	0,319518	7,828336295
9204	0,168239	0,302853	0,232079	1	0,064768	1,70317196
					$\lambda_{\max} =$	4,231111586

Vetor Prioridade Média Local – SIMPLIFICADA	
Pr 9201	0,406930118
Pr 9202	0,08625615
Pr 9203	0,438352181
Pr 9204	0,068461551

Fazem-se as prioridades médias locais considerando apenas a linha de maior somatório:

$$\text{Pr 9201} = \frac{1}{\frac{1}{1} + \frac{1}{4,717694} + \frac{1}{0,928318} + \frac{1}{5,943922}}$$

$$\text{Pr 9201} = 0,406930$$

$$\text{Pr 9202} = \frac{1}{\frac{1}{1} + \frac{1}{4,717694} + \frac{1}{0,928318} + \frac{1}{5,943922}} \times \frac{1}{4,717694}$$

$$\text{Pr 9202} = 0,08625615$$

$$\text{Pr 9203} = \frac{1}{\frac{1}{1} + \frac{1}{4,717694} + \frac{1}{0,928318} + \frac{1}{5,943922}} \times \frac{1}{0,928318}$$

$$\text{Pr 9203} = 0,438352$$

$$\text{Pr 9204} = \frac{1}{\frac{1}{1} + \frac{1}{4,717694} + \frac{1}{0,928318} + \frac{1}{5,943922}} \times \frac{1}{5,943922}$$

$$\text{Pr 9204} = 0,068461$$

Tabela 36

FEC	9201	9202	9203	9204	PML(s)	Somatório
9201	1	3,979057	1,587401	5,192494	0,47646	11,75895236
9202	0,251316	1	0,693361	3,301927	0,177299	5,246604337
9203	0,629961	1,44225	1	4,121285	0,276188	7,193495395
9204	0,192586	0,302853	0,242643	1	0,070053	1,738081861
					$\lambda_{\max} =$	4,107246707

Vetor Prioridade Média Local – SIMPLIFICADA	
Pr 9201	0,482192157
Pr 9202	0,121182514
Pr 9203	0,303762025
Pr 9204	0,092863304

Fazem-se as prioridades médias locais considerando apenas a linha de maior somatório:

$$\text{Pr 9201} = \frac{1}{\frac{1}{1} + \frac{1}{3,979057} + \frac{1}{1,587401} + \frac{1}{5,192494}}$$

$$\text{Pr 9201} = 0,482192$$

$$\text{Pr } 9202 = \frac{1}{\frac{1}{1 + \frac{1}{3,979057} + \frac{1}{1,587401} + \frac{1}{5,192494}}} \times \frac{1}{3,979057}$$

$$\text{Pr } 9202 = 0,121182$$

$$\text{Pr } 9203 = \frac{1}{\frac{1}{1 + \frac{1}{3,979057} + \frac{1}{1,587401} + \frac{1}{5,192494}}} \times \frac{1}{1,587401}$$

$$\text{Pr } 9203 = 0,303762$$

$$\text{Pr } 9204 = \frac{1}{\frac{1}{1 + \frac{1}{3,979057} + \frac{1}{1,587401} + \frac{1}{5,192494}}} \times \frac{1}{5,192494}$$

$$\text{Pr } 9204 = 0,092863$$

Tabela 37

Carregamento	9201	9202	9203	9204	PML(s)	Somatório
9201	1	1,817121	1	2,080084	0,332848	5,897204416
9202	0,550321	1	1	1,817121	0,239564	4,367441801
9203	1	1	1	2,080084	0,286075	5,080083823
9204	0,48075	0,550321	0,48075	1	0,141513	2,511820922
					$\lambda_{\max} =$	4,038299495

Vetor Prioridade Média Local – SIMPLIFICADA	
Pr 9201	0,329916382
Pr 9202	0,181559982
Pr 9203	0,329916382
Pr 9204	0,158607253

Fazem-se as prioridades médias locais considerando apenas a linha de maior somatório:

$$\text{Pr } 9201 = \frac{1}{\frac{1}{1 + \frac{1}{1,817121} + \frac{1}{1} + \frac{1}{2,080084}}}$$

$$\text{Pr } 9201 = 0,329916$$

$$\text{Pr } 9202 = \frac{1}{\frac{1}{1 + \frac{1}{1,817121} + \frac{1}{1} + \frac{1}{2,080084}}} \times \frac{1}{1,817121}$$

$$\text{Pr } 9202 = 0,181559$$

$$\text{Pr } 9203 = \frac{1}{\frac{1}{1 + \frac{1}{1,817121} + \frac{1}{1} + \frac{1}{2,080084}}} \times \frac{1}{1}$$

$$\text{Pr } 9203 = 0,329916$$

$$\text{Pr } 9204 = \frac{1}{\frac{1}{1 + \frac{1}{1,817121} + \frac{1}{1} + \frac{1}{2,080084}}} \times \frac{1}{2,080084}$$

$$\text{Pr } 9204 = 0,158607$$

Tabela 38

Nº Consum.	9201	9202	9203	9204	PML(s)	Somatório
9201	1	4,717694	3,556893	5,277632	0,586032	14,55221937
9202	0,211968	1	0,87358	2,080084	0,152306	4,165632254
9203	0,281144	1,144714	1	2,080084	0,172858	4,505942287
9204	0,189479	0,48075	0,48075	1	0,088804	2,150978628
					$\lambda_{\max} =$	4,0531785
Vetor Prioridade Média Local – SIMPLIFICADA						
Pr 9201	0,594321459					
Pr 9202	0,125977111					
Pr 9203	0,167090044					
Pr 9204	0,112611385					

Fazem-se as prioridades médias locais considerando apenas a linha de maior somatório:

$$\text{Pr 9201} = \frac{1}{\frac{1}{1} + \frac{1}{4,717694} + \frac{1}{3,556893} + \frac{1}{5,277632}}$$

$$\text{Pr 9201} = 0,594321$$

$$\text{Pr 9202} = \frac{1}{\frac{1}{1} + \frac{1}{4,717694} + \frac{1}{3,556893} + \frac{1}{5,277632}} \times \frac{1}{4,717694}$$

$$\text{Pr 9202} = 0,125977$$

$$\text{Pr 9203} = \frac{1}{\frac{1}{1} + \frac{1}{4,717694} + \frac{1}{3,556893} + \frac{1}{5,277632}} \times \frac{1}{3,556893}$$

$$\text{Pr 9203} = 0,167090$$

$$\text{Pr 9204} = \frac{1}{\frac{1}{1} + \frac{1}{4,717694} + \frac{1}{3,556893} + \frac{1}{5,277632}} \times \frac{1}{5,277632}$$

$$\text{Pr 9204} = 0,112611$$

Tabela 39

Perdas Técnicas	9201	9202	9203	9204	PML(s)	Somatório
9201	1	1,44225	0,90856	1,957434	0,298281	5,308243687
9202	0,693361	1	2,080084	2,620741	0,328886	6,394186492
9203	1,100642	0,48075	1	2,289428	0,248869	4,870820758
9204	0,510873	0,381571	0,43679	1	0,123963	2,329234601
					$\lambda_{\max} =$	4,149258669
Vetor Prioridade Média Local – SIMPLIFICADA						
Pr 9201	0,436440809					
Pr 9202	0,302611155					
Pr 9203	0,14548027					
Pr 9204	0,115467766					

Fazem-se as prioridades médias locais considerando apenas a linha de maior somatório:

$$\text{Pr 9201} = \frac{1}{\frac{1}{0,693361} + \frac{1}{1} + \frac{1}{2,080084} + \frac{1}{2,620741}} \times \frac{1}{0,693361}$$

$$\text{Pr 9201} = 0,436440$$

$$\text{Pr 9202} = \frac{1}{\frac{1}{0,693361} + \frac{1}{1} + \frac{1}{2,080084} + \frac{1}{2,620741}}$$

$$\text{Pr 9202} = 0,302611$$

$$\text{PrPR 9203} = \frac{1}{\frac{1}{0,693361} + \frac{1}{1} + \frac{1}{2,080084} + \frac{1}{2,620741}} \times \frac{1}{2,080084}$$

$$\text{Pr 9203} = 0,145480$$

$$\text{Pr 9204} = \frac{1}{\frac{1}{0,693361} + \frac{1}{1} + \frac{1}{2,080084} + \frac{1}{2,620741}} \times \frac{1}{2,620741}$$

$$\text{Pr 9204} = 0,115467$$

Tabela 40

Desc. Atm.	9201	9202	9203	9204	PML(s)	Somatório
9201	1	3	2,154435	1,259921	0,393709	7,41435574
9202	0,333333	1	0,550321	0,669433	0,13819	2,553087492
9203	0,464159	1,817121	1	1	0,223681	4,281279476
9204	0,793701	1,493802	1	1	0,244419	4,287502108
					$\lambda_{\max} =$	4,043249598

Vetor Prioridade Média Local – SIMPLIFICADA	
Pr 9201	0,385922662
Pr 9202	0,128640887
Pr 9203	0,179129432
Pr 9204	0,30630702

Fazem-se as prioridades médias locais considerando apenas a linha de maior somatório:

$$\text{Pr 9201} = \frac{1}{\frac{1}{1} + \frac{1}{3} + \frac{1}{2,154435} + \frac{1}{1,259921}}$$

$$\text{Pr 9201} = 0,385922$$

$$\text{Pr 9202} = \frac{1}{\frac{1}{1} + \frac{1}{3} + \frac{1}{2,154435} + \frac{1}{1,259921}} \times \frac{1}{3}$$

$$\text{Pr 9202} = 0,128640$$

$$\text{Pr 9203} = \frac{1}{\frac{1}{1} + \frac{1}{3} + \frac{1}{2,154435} + \frac{1}{1,259921}} \times \frac{1}{2,154435}$$

$$\text{Pr 9203} = 0,179129$$

$$\text{Pr } 9204 = \frac{1}{\frac{1}{1} + \frac{1}{3} + \frac{1}{2,154435} + \frac{1}{1,259921}} \times \frac{1}{1,259921}$$

$$\text{Pr } 9204 = 0,306307$$

Tabela 41

Queda Tensão	9201	9202	9203	9204	PML(s)	Somatório
9201	1	1,44225	1,817121	2,714418	0,377857	6,97378778
9202	0,693361	1	1,44225	2,289428	0,28449	5,42503933
9203	0,550321	0,693361	1	1,817121	0,211256	4,060803075
9204	0,368403	0,43679	0,550321	1	0,126397	2,35551459
					$\lambda_{\max} =$	4,007928381
Vetor Prioridade Média Local – SIMPLIFICADA						
Pr 9201	0,382835841					
Pr 9202	0,265443547					
Pr 9203	0,210682683					
Pr 9204	0,14103793					

Fazem-se as prioridades médias locais considerando apenas a linha de maior somatório:

$$\text{Pr } 9201 = \frac{1}{\frac{1}{1} + \frac{1}{1,44225} + \frac{1}{1,817121} + \frac{1}{2,714418}}$$

$$\text{Pr } 9201 = 0,382835$$

$$\text{Pr } 9202 = \frac{1}{\frac{1}{1} + \frac{1}{1,44225} + \frac{1}{1,817121} + \frac{1}{2,714418}} \times \frac{1}{1,44225}$$

$$\text{Pr } 9202 = 0,265443$$

$$\text{Pr } 9203 = \frac{1}{\frac{1}{1} + \frac{1}{1,44225} + \frac{1}{1,817121} + \frac{1}{2,714418}} \times \frac{1}{1,817121}$$

$$\text{Pr } 9203 = 0,210682$$

$$\text{Pr } 9204 = \frac{1}{\frac{1}{1} + \frac{1}{1,44225} + \frac{1}{1,817121} + \frac{1}{2,714418}} \times \frac{1}{2,714418}$$

$$\text{Pr } 9204 = 0,141037$$

Tabela 42

Matriz normalizada de critérios									
Prioridades	DEC	FEC	Carreg.	Nº Consum.	Perdas	Desc. Atm.	Queda Tensão	Vetor Prioridade	Somatório
DEC	1	1	2,758924	1,310371	0,693361	1	0,321829795	0,127164294	8,0844859
FEC	1	1	2,18976	1,44225	1,259921	0,584804	0,333333333	0,125255554	7,8100671
Carreg. Nº	0,362460124	0,45667114	1	0,242643	0,440911	0,485286	0,24264275	0,053267362	3,2306134
Consum.	0,763142828	0,693361274	4,121285	1	1,44225	1,08738	0,829826533	0,155082947	9,9372459
Perdas	1,44224957	0,793700526	2,268031	0,693361	1	0,693361	0,321829795	0,112080607	7,2125331
Desc. Atm.	1	1,709975947	2,060643	0,919641	1,44225	1	0,66943295	0,150056983	8,8019425
Queda Tensão	3,107232506	3	4,121285	1,205071	3,107233	1,493802	1	0,277092254	17,034623

Vetores Prioridades Critérios	
Pr DEC	0,086539088
Pr FEC	0,089632356
Pr Carregamento	0,065245924
Pr Nº Consumi.	0,223137921
Pr Perdas	0,086539088
Pr Desc. Atm.	0,180008557
Pr Queda Tensão	0,268897067

Fazem-se as prioridades médias locais considerando apenas a linha de maior somatório:

$$\text{Pr DEC} = \frac{1}{\frac{1}{3,107232} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4,121285} + \frac{1}{1,205071} + \frac{1}{3,107233} + \frac{1}{1,493802} + \frac{1}{1}} \times \frac{1}{3,107232}$$

$$\text{Pr 9201} = 0,086539$$

$$\text{Pr FEC} = \frac{1}{\frac{1}{3,107232} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4,121285} + \frac{1}{1,205071} + \frac{1}{3,107233} + \frac{1}{1,493802} + \frac{1}{1}} \times \frac{1}{3}$$

Pr 9202 = 0,089632

$$\text{Pr Car.} = \frac{1}{\frac{1}{3,107232} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4,121285} + \frac{1}{1,205071} + \frac{1}{3,107233} + \frac{1}{1,493802} + \frac{1}{1}} \times \frac{1}{4,121285}$$

Pr 9203 = 0,065245

$$\text{Pr N° C.} = \frac{1}{\frac{1}{3,107232} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4,121285} + \frac{1}{1,205071} + \frac{1}{3,107233} + \frac{1}{1,493802} + \frac{1}{1}} \times \frac{1}{1,205071}$$

Pr 9204 = 0,223137

$$\text{Pr Perd.} = \frac{1}{\frac{1}{3,107232} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4,121285} + \frac{1}{1,205071} + \frac{1}{3,107233} + \frac{1}{1,493802} + \frac{1}{1}} \times \frac{1}{3,107233}$$

Pr 9204 = 0,086539

$$\text{Pr D. Atm} = \frac{1}{\frac{1}{3,107232} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4,121285} + \frac{1}{1,205071} + \frac{1}{3,107233} + \frac{1}{1,493802} + \frac{1}{1}} \times \frac{1}{1,493802}$$

Pr 9204 = 0,180008

$$\text{Pr Q. Tensão} = \frac{1}{\frac{1}{3,107232} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4,121285} + \frac{1}{1,205071} + \frac{1}{3,107233} + \frac{1}{1,493802} + \frac{1}{1}}$$

Pr 9201 = 0,268897

Tabela 43

Prioridades Finais Sintetizadas	
PG 9201	0,44275874
PG 9202	0,179003867
PG 9203	0,225457844
PG 9204	0,152779549

Prioridades Globais obtidas:

$$\text{PG9201} = (0,406930 \times 0,086539) + (0,482192 \times 0,089632) + (0,329916 \times 0,065245) + (0,594321 \times 0,223137) + (0,436440 \times 0,086539) + (0,385922 \times 0,180008) + (0,382835 \times 0,268897)$$

PG9201 = 0,44275874

$$\text{PG9202} = (0,08625615 \times 0,086539) + (0,121182514 \times 0,089632) + (0,181559982 \times 0,065245) + (0,125977111 \times 0,223137) + (0,302611155 \times 0,086539) + (0,128640887 \times 0,180008) + (0,265443547 \times 0,268897)$$

PG9202 = 0,179003867

$$\text{PG9203} = (0,438352181 \times 0,086539) + (0,303762025 \times 0,089632) + (0,329916382 \times 0,065245) + (0,167090044 \times 0,223137) + (0,14548027 \times 0,086539) + (0,179129432 \times 0,180008) + (0,210682683 \times 0,268897)$$

PG9203 = 0,225457844

$$\begin{aligned} \text{PG9204} &= (0,068461551 \times 0,086539) + (0,092863304 \times 0,089632) + (0,158607253 \times \\ &0,065245) + (0,112611385 \times 0,223137) + (0,115467766 \times 0,086539) + (0,30630702 \times \\ &0,180008) + (0,14103793 \times 0,268897) \\ \text{PG9204} &= 0,152779549 \end{aligned}$$

APÊNDICE B - Dados técnicos dos alimentadores

Os dados do trabalho foram pesquisados no banco de dados na sede da permissionária COPREL em várias visitas. Dados técnicos dos alimentadores levantados para a pesquisa.

Tabela 1

Alimentador	C. ALTA – 09201
Demanda Contratada	6.500 KW
Demanda Máxima (carga pesada) ¹	6.100 KW
Projeção de Crescimento de Energia	3,0 % a.a.
Fator de Potência Médio ²	0,99
Corrente Máxima Medida	152 A
QT Máxima	8,6 %
Fator de Carga ²	0,47
Perdas ²	5,4 %
Nº Consumidores	1.936
Extensão Total MT	925 km
% Rede Monofásica	44 %
% Rede Bifásica	2,3 %
% Rede Trifásica	53,7 %
Total de Postes	10.376
% Madeira	13,0 %
% Concreto	87,0 %
DEC ²	54,34
FEC ²	34,44
Demanda Contratada	5.500 KW
Demanda Máxima (carga pesada) 1	5.000 KW
Projeção de Crescimento de Energia	4,0 % a.a.
Fator de Potência Médio 2	0,98
Corrente Máxima Medida	125 A
QT Máxima	5,1 %
Fator de Carga 2	0,32
Perdas 2	8,2 %
Nº Consumidores	259
Extensão Total MT	219 km

Tabela 2

Alimentador	C. ALTA – 09202
% Rede Monofásica	28,3 %
% Rede Bifásica	3,2 %
% Rede Trifásica	68,5 %
Total de Postes	2.365
% Madeira	7,6 %
% Concreto	92,4 %
DEC ²	50,10
FEC ²	32,43
Demanda Contratada	2.300 KW
Demanda Máxima (carga pesada) 1	1.312 KW
Projeção de Crescimento de Energia	6,0 % a.a.
Fator de Potência Médio 2	0,99
Corrente Máxima Medida	33 A
QT Máxima	4,1 %
Fator de Carga 2	0,36
Perdas 2	8,6 %
Nº Consumidores	195
Extensão Total MT	147 km
% Rede Monofásica	34 %
% Rede Bifásica	5 %
% Rede Trifásica	61 %
Total de Postes	1.600
% Madeira	6 %
% Concreto	94 %
DEC 2	40,00
FEC 2	30,00

Tabela 3

Alimentador	C. ALTA - 09204
Alimentador	C. ALTA – 09203
Demanda Contratada	1.230 KW
Demanda Máxima (carga pesada) ¹	1.000 KW
Projeção de Crescimento de Energia	6,0 % a.a.
Fator de Potência Médio ²	0,98
Corrente Máxima Medida	25 A
QT Máxima	7,7 %
Fator de Carga ²	0,44
Perdas ²	6,9 %
Nº Consumidores	119
Extensão Total MT	105 km
% Rede Monofásica	20 %
% Rede Bifásica	6 %
% Rede Trifásica	74 %
Total de Postes	1.134
% Madeira	13 %
% Concreto	87 %
DEC ²	44,81
FEC ²	24,31

Tabela 4 - Índices operativo

	DEC			FEC			Carreg.		Cientes	Perdas	Desc. Atm	Nível Tensão	
AL	H			Vezes			%		Unidades	%	%	%	
	Meta	Valor	Violação	Meta	Valor	Violação	Limite	Valor				Meta	Valor
9201	43	51,22	8,22	29	33,43	4,43	67	44	1936	5,4	32	7,5	8,6
9202	49,7	46,21	-3,49	30	30,97	0,97	67	35	259	8,2	23	7,5	5,1
9203	40	34,35	-5,65	30	22,03	-7,97	67	11	195	8,6	36	7,5	4,1
9204	43,6	35,88	-7,69	30	25,87	-4,13	67	19	119	6,9	30	7,5	7,7

Fonte: COPREL (2010)

Os dados das tabelas acima foram disponibilizados pela COPREL, sendo coletados durante um período de 12 meses, de agosto de 2009 a julho de 2010.