MARCELO MAIA

**ALOCÇÃO DE DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO
PRIMÁRIA DE ENERGIA**

**São Paulo
2015**

MARCELO MAIA

**ALOCÇÃO DE DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO
PRIMÁRIA DE ENERGIA**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo, como parte
dos requisitos para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Elétrica.

**São Paulo
2015**

MARCELO MAIA

**ALOCÇÃO DE DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO
PRIMÁRIA DE ENERGIA**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo, como parte
dos requisitos para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração:
Sistemas de Potência

Orientador: Prof. Dr. Marcos Gouvêa

**São Paulo
2015**

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 21 de janeiro de 2015.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

Catálogo-na-publicação

Maia, Marcelo

Alocação de dispositivos de proteção em redes de distribuição primária de energia / M. Maia. – versão corr. -- São Paulo, 2015.

107 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1. Proteção de sistemas elétricos 2. Distribuição de energia elétrica I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II. t.

DEDICATÓRIA

À minha linda família, minha esposa Pérsia e meus filhos Marcelo e Murilo – motivação e incentivo à realização dos meus ideais – com quem compartilho todos os momentos bons e difíceis da vida.

Com muito carinho, dedico a minha mãe Iolanda e ao meu falecido Pai Carlos, pela compreensão, apoio e contribuição para minha formação acadêmica.

AGRADECIMENTO

A Deus por ter-me proporcionado a oportunidade de trilhar este maravilhoso caminho do qual tenho muito orgulho.

Ao meu professor orientador, Marcos Gouvêa, pela dedicação do seu tempo, pelo compartilhamento de seu conhecimento, por sua boa vontade e paciência na realização deste trabalho.

Aos professores da banca examinadora, Carlos César Barioni de Oliveira e Carlos Frederico Meschini Almeida, pela predisposição de seu tempo e conhecimentos em analisar este trabalho e propor sugestões de melhoria.

Aos meus familiares, pelo apoio e a motivação para continuar e concluir este trabalho.

Por fim, a todos aqueles que não foram citados, mas que contribuíram, de alguma maneira, para o sucesso na concretização deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia de alocação de dispositivos de proteção e manobra ao longo de alimentadores primários de um sistema de distribuição de energia elétrica, de forma a otimizar a quantidade de consumidores afetados e da energia média não distribuída, na ocorrência de desligamentos provocados por uma falha. Na alocação dos dispositivos, utiliza-se um algoritmo matemático que considera vários parâmetros envolvidos no fenômeno, que explicam o mérito de cada alternativa possível, ponderando as variações de benefício. Além de indicar os locais adequados para instalação dos dispositivos de proteção e manobra, a metodologia proposta permite a elaboração de regras para auxiliar a priorização de ações de manutenção e para otimizar os investimentos em alimentadores. Outro resultado da pesquisa é a relocação de dispositivos de proteção e manobra existentes em alimentadores, considerando o seu reposicionamento para melhorar o desempenho em face de faltas que provocam interrupções e portanto diminuindo os indicadores FEC – frequência média de interrupção de fornecimento e a END pela energia média não distribuída. Com o objetivo de comprovar a eficácia da metodologia proposta, desenvolveu-se uma ferramenta para sua operacionalização e posterior aplicação com sucesso, em um Estudo de Caso real de uma Concessionária brasileira.

Palavras-Chaves: Proteção otimizada. Rede de distribuição. Dispositivos de proteção. Planejamento. Investimentos e Manutenção.

ABSTRACT

This paper presents a methodology for allocation of protection and switching devices along primary feeders of a system for electricity distribution in order to optimize both the number of affected consumers and the average amount of energy that is not supplied, in case of interruptions caused by a failure. For the allocation of the devices it is used a mathematical algorithm that considers various parameters involved in the phenomenon, explaining the relevance of each possible alternative and pondering benefit variations. Besides indicating the adequate places to install the protection and switching devices, the proposed methodology allows elaborating roles that help taking prior actions to maintain and optimize the investments in feeders. Other aspect of the research is the relocation of protection and switching devices that exist in the feeders, considering their replacing in order to enhance the performance in the occurrence of failures that cause interruptions and so, reducing the FEC indicators – supplying interruption medium frequency – and the END (Energy not supplied). Aiming to prove the effectiveness of the proposed methodology, it was developed a tool for its operation and subsequent successful application in a study case, that represents a real situation of a Brazilian electrical power retailer company.

Index Terms: Optimum protection. distribution networks. protective devices. Planning. Investment and Maintenance.

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Revisão PRODIST Módulo 8	20
Tabela 2.2 – Padrões Individuais de Continuidade	20
Tabela 2.3 – Valores propostos do kei	22
Tabela 3.1 – Risco de Perda de clientes	48
Tabela 3.2 – Quantidade de Clientes Afetados por Interrupções devidas a falhas para cada alocação de 1 DPM	49
Tabela 5.1 – Avaliação dos alimentadores	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Técnica em Profundidade.....	40
Figura 2.2 – Árvore de Busca em Profundidade	40
Figura 2.3 – Busca pela Melhor Escolha	41
Figura 3.1 - Alocação de DPM no sistema.....	44
Figura 3.2 – Região do DPM.....	45
Figura 3.3 – Alimentador com disjuntor na subestação	48
Figura 3.4 – Representação da alocação.....	49
Figura 3.5 – Representação da Metodologia	50
Figura 3.6 – Representação dos índices de méritos.....	51
Figura 3.7 – Alimentador exemplo (60 clientes e 6 km comprimento).....	52
Figura 3.8a – Proteção alocada na barra 2.....	53
Figura 3.8b – Proteção alocada na barra 3.....	53
Figura 3.8c – Proteção alocada na barra 4.....	53
Figura 3.9a – Proteção alocada na barra 2 e 3	54
Figura 3.9b – Proteção alocada na barra 3 e 4.....	54
Figura 4.1 – Níveis de Busca em Profundidade	57
Figura 4.2 – Diagrama do processo	58
Figura 4.3 – Diagrama de posições	60
Figura 4.4 – Exemplo da posição <i>I</i> 1 do IMax(1)	60
Figura 4.5 – Exemplo da posição <i>I</i> 2 do IMax(2)	61
Figura 4.6 – Curva assintótica para o Desempenho máximo do Alimentador	65
Figura 4.7 – Curva DMA Ideal, Projeto e Real	67
Figura 4.8 – Exemplo do índice DMA Ideal para três alimentadores	68
Figura 4.9 – Curva Alta.	69
Figura 4.10 – Curva Média.....	69
Figura 4.11 – Curva Baixa.....	69
Figura 4.12 – Fluxograma do “Módulo de Avaliação dos Alimentadores”	70
Figura 4.13 – Fluxograma das etapas do processo da metodologia	70
Figura 5.1 – Divisão da Tela Principal da Ferramenta DMA.....	72
Figura 5.2 - Seleção do Tipo de Arquivo de Importação	73
Figura 5.3 – Tabela de Parametrização de Custos das Chaves.....	73
Figura 5.4 – Gráfico da metodologia DMA	74
Figura 5.6 – Relatório de Projeto.....	75
Figura 5.7 – a) Diagnóstico Técnico Geral do Circuito; b) Quantidade de Cargas por Tipo (ET e EP); c) Quantidade de Chaves por Tipo; d) Comprimento Total da Rede MT e BT; e) Quantidade de Reguladores de Tensão e Descrição; f) Quantidade de Banco de Capacitores e Descrição; g) Quantidade de Trafos de Linha e Descrição	76
Figura 5.8 – a) Janela de Edição dos Equipamentos de Rede; b) Edição do Fundo de Tela....	77
Figura 5.9 – Janela de Seleção dos Trechos Ponderados	78
Figura 5.10 – Aba de Cálculo do DMA.....	79
Figura 5.11 – Aba de Resultados do Cálculo de DMA	79
Figura 5.12a – Carregamento ou Criação de um Projeto	80
Figura 5.12b – Aba de Projeto com um Projeto em Fase de Edição	80
Figura 5.13 – Alimentadores da SE VPL	81
Figura 5.14 – Resultado da Hierarquização do DMA pela Diferença entre o Valor Ideal e o Valor Real dos Alimentadores da SE VPL, pelo Critério DMA Consumidor	82

Figura 5.15 – Resultado da Hierarquização do DMA pela Diferença entre o Valor Ideal e o Valor Real dos Alimentadores da SE VPL, pelo Critério DMA Carga	83
Figura 5.16 – Resultado da Hierarquização do DMA pela Diferença entre o Valor Ideal e o Valor Real dos Alimentadores da SE VPL, pelo Critério DMA Híbrido	83
Figura 5.17– Alimentador VPL–01 que Será Abordado para Projeto.....	84
Figura 5.18 – Seleção de Parâmetros de Projeto para o Alimentador VPL–01.....	85
Figura 5.19 – Janela de Configurações do DMA, para Importação de Ocorrências	86
Figura 5.20 – Janela de Configurações do DMA, para Configuração de Propriedades	87
Figura 5.21 – Relacionamento Estabelecido entre as Proteções do DMA Real e do DMA Projetado.....	88
Figura 5.22 – Lista de Proteções Novas e de Proteções Existentes.....	88
Figura 5.23 – Configuração de Proteções Sugeridas pelo Projeto VPL–01	89
Figura 5.54 – Tela de Resultado do PROJETO VPL–01	90
Figura 5.25 – Resultado em Forma de Relatório, do PROJETO VPL–01	91

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVO.....	14
2. ESTADO DA ARTE.....	18
2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	18
2.2 ARCABOUÇO REGULATÓRIO [PRODIST (2014)]	18
2.2.1 Procedimentos de Distribuição da ANEEL - Módulo 8	18
2.2.2 Indicadores de Continuidade.....	23
2.3 DPM DE REDES PRIMÁRIAS [CPFL (2012), ENERSUL (2013), CEMIG (2014), AES (2005) e EDP (2013)].....	25
2.3.1 Equipamentos de Seccionamento e DPM	25
2.3.2 Equipamentos de Proteção contra Sobrecorrente.....	26
2.3.3 Normas e Práticas de Aplicação de Dispositivos de Proteção e Manobra	28
2.4 MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO E TÉCNICAS DE BUSCAS.....	29
2.4.1 Algoritmo Genético [WENYU (2004)]	29
2.4.2 Programação Linear Inteira Mista [OLIVEIRA (2009)]	33
2.4.3 Recozimento Simulado (Simulated Annealing) [ZAMBON (2006)]	35
2.4.4 Colônia de Formigas (ACS – Ant Colony Systems) [TENG (2003)].....	36
2.4.5 Busca Tabu [SEDANO (2006)]	37
2.4.6 Algoritmo Memético (Memetic Algorithm) [GUERRA (2008)]	38
2.4.7 Busca em Profundidade [OLIVEIRA (2009)].....	39
a) Busca pela melhor escolha (best-first search) [OLIVEIRA (2009)].....	41
b) Método Gradiente (Gradient Search) [OLIVEIRA (2009)]	41
3. DIRETRIZ METODOLÓGICA	42
3.1 MOTIVAÇÃO.....	42
3.2 CONCEITOS	43
3.2.1 Alimentadores Primários.....	43
3.2.2 Alocação de Dispositivo de Proteção e Manobra	43
3.2.3 Taxa de Falha.....	44
3.2.4 Densidade de Clientes	45
3.2.5 Melhoria da Continuidade pela Alocação de um DPM	45
3.3 DIRETRIZ METODOLÓGICA.....	46
3.3.1 Linhas Gerais	46
3.3.2 Desempenho Máximo de Alimentador.....	47
3.3.3 Exemplo de Aplicação do Conceito de DMA	51
4. METODOLOGIA PROPOSTA	56
4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	56
4.2 ESTRUTURA METODOLÓGICA.....	57

4.3 BLOCO 1 - BASE DE DADOS	58
4.4 BLOCO 2 - CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO – DADOS GERAIS	59
4.5 BLOCO 3 - GERAÇÃO DE ALTERNATIVAS DE ALOCAÇÃO DE DPMS	59
4.5.3 Formulação da Metodologia para cálculo do DMA	60
4.6 BLOCO 4 - ANÁLISE E SELEÇÃO DE ALTERNATIVAS DE ALOCAÇÃO DE DPMS	62
4.7 BLOCO 5 - RESULTADOS	64
4.7.1 Ramificação do DMA	64
4.7.2 Critério de Finalização.....	65
4.7.3 Cálculo de Desempenho	66
4.7.4 Priorização dos alimentadores.....	67
5. APLICAÇÃO DA SOLUÇÃO.....	71
5.1 FERRAMENTA COMPUTACIONAL DE OTIMIZAÇÃO	71
5.1.1 Ferramenta DMA.....	71
5.2 ESTUDO DE CASO	80
5.2.1 SE Várzea Paulista	80
5.2.2 Dados Adicionais da Aplicação Piloto.....	81
5.2.3 Resultados.....	82
5.2.4 Escolha do Piloto.....	83
6. CONCLUSÃO.....	92
7 ANEXOS.....	94
7.1 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94
7.2 PUBLICAÇÃO EM CONGRESSO INTERNACIONAL - CLAGTEE 2013.....	97

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVO

As mudanças de critérios determinadas pelo órgão regulador de energia elétrica a partir de 2010, pelas quais a violação individual dos indicadores técnicos (DIC, FIC, DICRI e DMIC) trariam a respectiva compensação financeira diretamente aos clientes afetados, aumentou a preocupação das distribuidoras com relação à violação dos limites aos clientes de média tensão, haja vista que o critério de ressarcimento é obtido com base no consumo e tarifas do cliente. Este efeito tende a priorizar os investimentos no sistema de distribuição de forma a resguardar ou melhorar os indicadores individuais aos clientes, principalmente àqueles que representam os de maiores faturamentos.

Os sistemas de distribuição de energia elétrica vêm a cada dia se beneficiar de novas metodologias para a melhoria do serviço, particularmente para diminuir o tempo e a frequência com que os clientes ficam sem energia elétrica. Isto se deve à necessidade do atendimento das metas propostas pelo agente regulador e da satisfação dos clientes, sendo esta avaliada por indicadores, cujos limites requerem crescente melhoria.

Para o sistema elétrico aéreo de distribuição, observa-se que grande parte das falhas são intrínsecas à rede elétrica, provocando vários problemas, principalmente em trechos primários em que há concentração de clientes mais sensíveis à interrupção do serviço. Um dos principais recursos para a melhoria do serviço é isolar o trecho em defeito e reconfigurar a rede por meio de dispositivos de proteção e manobra (DPM), tais como religadores inteligentes, religadores automáticos (comando remoto), religadores convencionais (comando local), seccionalizadores e chaves-fusíveis.

Nesse cenário, esta pesquisa propõe uma metodologia fundamentada em algoritmo prático e eficaz na alocação otimizada dos DPM ao longo de um alimentador, bem como no desenvolvimento de uma ferramenta computacional ágil, para aplicação desta alocação, com o objetivo de otimizar a continuidade de serviço e auxiliar na operação do sistema elétrico. A metodologia proposta conceitua e determina índices de mérito para a avaliação técnico-econômica das possíveis alternativas de alocação dos DPM, de forma a permitir a seleção da mais adequada. A formulação do algoritmo leva em consideração as técnicas de busca em profundidade.

Apesar de formulação matemática simples e direta, o algoritmo utilizado para encontrar a solução ótima na alocação dos DPM contempla vários parâmetros envolvidos nos eventos de interrupção de energia, quer sejam referentes à estrutura da rede, quer sejam parâmetros operacionais. Dentre esses estão: a topologia e o carregamento da rede, a quantidade e a localização de consumidores, taxas de falhas, localização e características de DPM existentes, clientes especiais e arborização.

O foco central da metodologia proposta é minimizar a quantidade de clientes interrompidos (FEC/FIC) tanto em média tensão, que são atendidos diretamente pela rede primária de distribuição, quanto os em baixa tensão, atendidos por meio dos transformadores de distribuição sem a necessidade de reconfiguração da rede por meio de manobras envolvendo alimentadores vizinhos ou construção de novos.

Embora possa refletir positivamente nos indicadores de continuidade que consideram o período de tempo de interrupção em sua formulação (DEC, DIC, DICRI, DMIC), o objetivo do estudo é minimizar a quantidade de clientes interrompidos, portanto não houve a necessidade de aprofundar esses méritos, tampouco em definir os tipos de dispositivos a ser alocados (religador, chave fusível etc) como também seus ajustes. Portanto o resultado deste trabalho, que é uma etapa de planejamento anterior ao do estudo de seletividade e coordenação da proteção, deve ser encaminhado à área engenharia de proteção, para que sejam estabelecidas as tipologias e ajustes, de acordo com as normas e padrão de cada Distribuidora.

Por outro lado, a pesquisa abrange outros objetivos complementares, quais sejam:

- Aplicar a alocação dos DPM de forma a otimizar sua localidade e as quantidades.
- Avaliar os atuais critérios / regras usualmente praticadas na alocação dos DPM e propor novos.
- Definir critério de viabilidade de manutenção e de investimentos em alimentadores, fundamentado na priorização estabelecida pelo índice de mérito determinado pela metodologia, objetivando a melhoria de indicadores técnicos e econômicos.

Além deste capítulo introdutório, esta dissertação está estruturada da seguinte forma:

Capítulo 2 – Estado da Arte

- i. Contempla a apresentação do cenário Regulatório, no que tange às questões de qualidade de fornecimento de energia.
- ii. Apresenta as características gerais dos critérios de instalação de dispositivos de proteção e de manobra utilizados atualmente no sistema de distribuição de energia, com base em pesquisa realizada em distribuidoras de energia elétrica brasileiras.
- iii. Descreve metodologias publicadas na bibliografia especializada, para a avaliação e otimização da alocação de dispositivos de proteção e manobra.

Capítulo 3 – Diretrizes

- i. Apresenta os objetos da pesquisa na busca da metodologia de alocação de DPM.
- ii. Descreve o alcance do estudo (alimentadores, dispositivo de proteção e manobra etc).
- iii. Propõe as diretrizes metodológicas para a solução.

Capítulo 4 – Solução Proposta;

- i. Conceitua elementos a serem utilizados na metodologia .
- ii. Descreve o procedimento metodológico, incluindo casos ilustrativos.
- iii. Conceitua o índice de mérito e suas variáveis para avaliar as alternativas de alocação.
- iv. Apresenta detalhes para a aplicação da metodologia.

Capítulo 5 – Ferramenta e Estudo de Caso

- i. Especifica ferramenta computacional para aplicação da solução
- ii. Aplicação da metodologia em Estudo de Caso, utilizando a ferramenta desenvolvida com o objetivo de ilustrar e verificar da viabilidade e eficácia da proposta.

Capítulo 6 – Conclusão

- i. Descreve os resultados da pesquisa e comenta o estudo de caso.
- ii. Temas para a continuidade da pesquisa em objetos que foram detectados porém não explorados no âmbito deste trabalho.

Capítulo 7 – Anexo

- i. Referências bibliográficas.

- ii. Publicações referentes à presente dissertação em seminários e congressos nacionais e internacionais.

2. ESTADO DA ARTE

2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

As pesquisas bibliográficas conduzidas para contextualizar o tema de alocação de dispositivos de proteção e manobra em redes de distribuição primária abrangem:

- o Arcabouço Regulatório que rege a matéria, focado nas resoluções do Órgão Regulador sobre conceitos e indicadores de continuidade do serviço;
- os Dispositivos de Manobra e Proteção utilizados em redes primárias brasileiras;
- as Normas e as Práticas de Aplicação de Dispositivos de Manobra e Proteção usualmente utilizadas pelas concessionárias de distribuição brasileiras;
- Métodos de Otimização e Técnicas de Buscas de soluções para a alocação dos dispositivos de proteção, tais como chaves fusíveis, seccionadoras e religadoras, com trabalhos e estudos associados a estes métodos.

2.2 ARCABOUÇO REGULATÓRIO [PRODIST (2014)]

2.2.1 Procedimentos de Distribuição da ANEEL - Módulo 8

Os Procedimentos de Distribuição – PRODIST são documentos elaborados pela ANEEL que regulam atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica.

A qualidade de fornecimento de energia é tratada no Módulo 8 PRODIST que se divide em duas partes, sendo a primeira sobre Qualidade do Produto, que não se relaciona a esta dissertação e a segunda à Qualidade do Serviço, que contempla os indicadores técnicos, dentre os quais estão presentes aqueles de interesse dessa pesquisa.

O módulo qualidade do produto trata da terminologia que caracteriza os fenômenos, parâmetros e valores de referência relativos à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações em forma de onda de tensão, estabelecendo mecanismos que possibilitem à ANEEL fixar padrões para os indicadores de QEE, que são:

- Tensão em Regime Permanente;
- Fator de Potência;
- Harmônicos;
- Desequilíbrio de Tensão;
- Flutuação de Tensão;
- Variação de Tensão de Curta Duração;
- Variação de Frequência.

O módulo qualidade do Serviço tem como objetivo estabelecer procedimentos relativos à qualidade do serviço prestado pelas distribuidoras aos consumidores, dentre os quais está a definição de indicadores e padrões de qualidade de serviço, de interesse para esta dissertação, de forma a oferecer:

- mecanismos para acompanhamento e controle do desempenho das distribuidoras;
- subsídios para os planos de reforma, melhoramento e expansão da infra-estrutura das distribuidoras e
- aos consumidores, parâmetros para avaliação do serviço prestado pela distribuidora.

Outros temas, como procedimentos relativos à qualidade do serviço prestado pelas transmissoras detentoras de Demais Instalações de Transmissão – DIT aos consumidores e distribuidoras, também são tratados neste tópico do Módulo 8 do PRODIST.

A título de informação, estão relacionadas a seguir, as principais revisões publicadas no PRODIST, relacionadas à qualidade do serviço:

Revisão	Motivo da Revisão	Instrumento de aprovação pela ANEEL	Data de vigência
0	Primeira versão aprovada (após realização da AP 014/2008)	Resolução Normativa nº 345/2008	De 31/12/2008 a 31/12/2009
1	Revisão 1 (após realização da AP 033/2009)	Resolução Normativa nº 395/2009	De 01/01/2010 a 31/12/2010
2	Revisão 2 (após realização da AP 046/2010)	Resolução Normativa nº 424/2010	De 01/01/2011 a 05/09/2011

3	Revisão 3 (após realização da 2ª Etapa da AP 046/2010)	Resolução Normativa nº 444/2011	De 06/09/2011 a 31/01/2012
4	Revisão 4 (após realização da AP 064/2011)	Resolução Normativa nº 469/2011	De 01/02/2012 a 31/12/2014
5	Revisão 5 (após realização da AP 093/2013)	Resolução Normativa nº 602/2014	01/01/2015

Tabela 2.1 – Revisão PRODIST Módulo 8

A revisão das regras de formação dos conjuntos de unidades consumidora resultou:

a) Novos padrões dos indicadores de continuidade individual são ilustrados na Tabela 2.2.

Faixa de variação dos Limites Anuais de Indicadores de Continuidade dos Conjuntos (DEC ou FEC)		Limite de Continuidade por Unidade Consumidora					
		Unidades Consumidoras com Tensão Contratada ≤ 1kV situadas em áreas urbanas					
		DIC (horas)			FIC (interrupções)		
		Anual	Trim.	Mensal	Anual	Trim.	Mensal
Resolução Normativa nº 469/2011	1	16,00	8,00	4,00	11,20	5,60	2,80
	10	20,30	10,15	5,07	13,45	6,72	3,36
	20	25,08	12,54	6,27	15,96	7,98	3,99

Tabela 2.2 – Padrões Individuais de Continuidade

b) Formação geográfica dos conjuntos elétricos baseada no agrupamento da área da subestação elétrica, em vez de limites administrativos fundamentados em região e municípios.

A revisão do procedimento de compensação para transgressão dos indicadores de continuidade e frequência de interrupção passou a ser regulada pelas expressões a seguir:

a) Compensação pela Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão (DIC), utilizando a seguinte fórmula:

$$Valor = \left(\frac{DIC_v}{DIC_p} - 1 \right) DIC_p \times \frac{EUSD_{médio}}{730} \times kei \quad (2.1)$$

b) Compensação pela Frequência de Interrupção individual por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão (FIC), utilizando a seguinte fórmula:

$$Valor = \left(\frac{FIC_v}{FIC_p} - 1 \right) DIC_p \times \frac{EUSD_{\text{médio}}}{730} \times kei \quad (2.2)$$

c) Compensação pela Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão (DMIC), utilizando a seguinte fórmula:

$$Valor = \left(\frac{DMIC_v}{DMIC_p} - 1 \right) DMIC_p \times \frac{EUSD_{\text{médio}}}{730} \times kei \quad (2.3)$$

d) Duração da interrupção individual ocorrida em dia crítico por unidade consumidora ou ponto de conexão (DICRI), utilizando a seguinte fórmula:

$$Valor = \left(\frac{DICRI_v}{DICRI_p} - 1 \right) DICRI_p \times \frac{EUSD_{\text{médio}}}{730} \times kei \quad (2.4)$$

Onde:

DIC_v = duração de interrupção por unidade consumidora ou por ponto de conexão, conforme cada caso, verificada no período considerado, expressa em horas e centésimos de hora;

DIC_p = limite de continuidade estabelecido no período considerado para o indicador de duração de interrupção por unidade consumidora ou por ponto de conexão, expresso em horas e centésimos de hora;

DMIC_v = duração máxima de interrupção contínua por unidade consumidora ou por ponto de conexão, conforme cada caso, verificada no período considerado, expressa em horas e centésimos de hora;

DMICp = limite de continuidade estabelecido no período considerado para o indicador de duração máxima de interrupção contínua por unidade consumidora ou por ponto de conexão, expresso em horas e centésimos de hora;

FICv = frequência de interrupção por unidade consumidora ou por ponto de conexão, conforme cada caso, verificada no período considerado, expressa em número de interrupções;

FICp = limite de continuidade estabelecido no período considerado para o indicador de frequência de interrupção por unidade consumidora ou por ponto de conexão, expresso em número de interrupções e centésimo do número de interrupções;

DICRIv = duração da interrupção individual ocorrida em dia crítico por unidade consumidora ou ponto de conexão, expressa em horas e centésimos de hora;

DICRIp = limite de continuidade estabelecido para o indicador de duração da interrupção individual ocorrida em dia crítico por unidade consumidora ou ponto de conexão, expresso em horas e centésimos de hora;

EUSDmédio = média aritmética dos encargos de uso do sistema de distribuição correspondentes aos meses do período de apuração do indicador;

730 = número médio de horas no mês;

kei = coeficiente de majoração cujo valores estão na tabela 2.3.

Segmento	Kei
Baixa Tensão	15
Média Tensão	20
Alta Tensão	27

Tabela 2.3 – Valores propostos do kei

Essas revisões promovidas na regulação, introduzindo a reorganização dos conjuntos e penalidades quando houver transgressões de indicadores de qualidade, redirecionaram recursos para a priorização de obras e para ações de inspeção e manutenção preventiva de redes

buscando o atendimento desses novos padrões de continuidade, inclusive o aperfeiçoamento dos critérios de alocação dos dispositivos de proteção e manobra.

2.2.2 Indicadores de Continuidade

Como uma forma de avaliar a qualidade dos serviços de fornecimento, a ANEEL estabeleceu indicadores de continuidade de serviço, que por meio do controle das interrupções, do cálculo e da divulgação dos indicadores de continuidade de serviço, as distribuidoras, os consumidores e a ANEEL podem avaliar a qualidade do serviço prestado e o desempenho do sistema elétrico.

a) Indicadores de Continuidade Individuais

A Resolução Normativa nº 469/2011 da ANEEL, de 01.02.12 estabeleceu os seguintes indicadores de continuidade individuais :

- DIC utilizando a equação (2.5):

$$DIC = \sum_{i=1}^n t_{(i)} \quad (2.5)$$

- FIC utilizando a equação (2.6):

$$FIC = n \quad (2.6)$$

- DMIC utilizando a equação (2.7):

$$DMIC = t_{(i)} \max \quad (2.7)$$

- DICRI utilizando a equação (2.8):

$$DICRI = t_{crítico} \quad (2.8)$$

Onde:

DIC = duração de interrupção individual por unidade consumidora ou por ponto de conexão, expressa em horas e centésimos de hora;

FIC = frequência de interrupção individual por unidade consumidora ou ponto de conexão, expressa em número de interrupções;

DMIC = duração máxima de interrupção contínua por unidade consumidora ou por ponto de conexão, expressa em horas e centésimos de hora;

DICRI = duração da interrupção individual ocorrida em dia crítico por unidade consumidora ou ponto de conexão, expressa em horas e centésimos de hora;

i = índice de interrupções da unidade consumidora no período de apuração, variando de 1 a n ;

n = número de interrupções da unidade consumidora considerada, no período de apuração;

$t(i)$ = tempo de duração da interrupção (i) da unidade consumidora considerada ou ponto de conexão, no período de apuração;

$t(i) \max$ = valor correspondente ao tempo da máxima duração de interrupção contínua (i), no período de apuração, verificada na unidade consumidora considerada, expresso em horas e centésimos de horas;

$t_{\text{crítico}}$ = duração da interrupção ocorrida em dia crítico.

b) Indicadores de Continuidade Coletivos

A Resolução Normativa nº 469/2011 da ANEEL, de 01.02.12 estabeleceu os seguintes indicadores de continuidade coletiva :

- DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora), utilizando a equação (2.9):

$$DEC = \frac{\sum_{i=1}^{Cc} DIC(i)}{Cc} \quad (2.9)$$

- FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora), utilizando a equação (2.10):

$$FEC = \frac{\sum_{i=1}^{Cc} FIC(i)}{Cc} \quad (2.10)$$

Onde:

DEC = duração equivalente de interrupção por unidade consumidora, expressa em horas e centésimos de hora;

FEC = frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora, expressa em número de interrupções e centésimos do número de interrupções;

i = índice de unidades consumidoras atendidas em BT ou MT faturadas do conjunto.

2.3 DPM DE REDES PRIMÁRIAS [CPFL (2012), ENERSUL (2013), CEMIG (2014), AES (2005) e EDP (2013)]

Este item apresenta os principais tipos de equipamentos de proteção e manobra padronizados de interesse da pesquisa em redes primárias utilizados por distribuidoras brasileiras de energia elétrica, para a classe entre 15kV e 34,5kV, levantados por meio de consulta ao setor.

Dentre esses dispositivos estão os Equipamentos de Seccionamento e Manobra e os Equipamentos de Proteção contra Sobrecorrente, cujas características básicas são apresentadas a seguir:

2.3.1 Equipamentos de Seccionamento e DPM

Os equipamentos de seccionamento e manobra são utilizados para modificar a topologia da rede pelo desligamento ou ligação intencional de segmentos da rede.

Esses equipamentos têm importância na operação e no desempenho dos sistemas de distribuição, permitindo sua operação com níveis adequados de segurança e de continuidade.

As características técnicas básicas, do ponto de vista elétrico, dos principais tipos de equipamentos de seccionamento e manobra utilizados no sistema de distribuição brasileiro são :

- Chaves para operação sem carga: são utilizadas em operações com a rede desenergizada,
- Chaves para operação em carga: são utilizadas em operações com a rede em carga, usualmente para reconfigurar a rede sem a necessidade de desenergização de alimentadores, minimizando o tempo necessário à realização de manobra, além de restringir a quantidade de consumidores afetados pela operação.

2.3.2 Equipamentos de Proteção contra Sobrecorrente

Durante um curto-circuito, há o surgimento de uma corrente de elevada intensidade que, por sua vez, provoca efeitos térmicos e mecânicos em equipamentos da rede.

Os efeitos mecânicos podem deformar condutores e romper materiais isolantes, enquanto que os efeitos térmicos, podem causar aquecimento excessivo dos condutores e dos materiais isolantes, deteriorando-os. A intensidade de ambos efeitos dependem do valor eficaz da corrente de falha e também de sua duração.

Para evitar os efeitos danosos decorrentes das correntes de falta em redes primárias de distribuição, são utilizados os seguintes equipamentos, que promovem o adequado seccionamento da rede, isolando o trecho com defeito:

- Chaves-Fusíveis é um dispositivo empregado em derivações de ramais do tronco da rede primária, que tem como função a abertura de fase circuito através de um conjunto

com elo fusível e molas. Os cartuchos fusíveis devem ter capacidade de interrupção superior à máxima corrente de curto-circuito disponível no ponto de instalação. São aplicados com muita frequência, devido a seu baixo custo em relação a outros dispositivos para a mesma funcionalidade.

- Chaves–Fusíveis Religadora com o intuito de substituir as características funcionais de um religador para os defeitos transitórios, utiliza-se “chave–fusível religadora” ou “chave repetidora de 3 tiros”, em que há múltiplos cartuchos de fusíveis queimados e substituídos sequencialmente por um mecanismo com propulsão de molas, remotamente utilizadas em áreas rurais.
- Religadores é um equipamento de seccionamento que opera automaticamente, em carga e tem capacidade de interromper correntes de defeito.

A operação de um religador eletromecânico é regida por uma curva Tempo x Corrente rápida e outra com retardo temporizado. A característica de operação do religador permite que ambas as curvas sejam usadas em uma sequência de aberturas e religamentos, de maneira que a operação se realize na curva rápida durante as primeiras operações e na curva lenta nas últimas operações antes do bloqueio (abertura definitiva). Com isso, o emprego do religador evita que faltas de natureza transitória provoquem a queima de elos fusíveis.

O religador eletrônico tem função similar ao eletromecânico, porém oferece várias possibilidades de ajustes e formas de atuação com o objetivo de eliminar os defeitos do sistema elétrico.

- Seccionalizadores é um equipamento de seccionamento que opera sem carga, após uma quantidade pré-determinada e sucessivas de energização e desenergização.

É sempre instalado a jusante de um outro equipamento de proteção automático (religador ou disjuntor) , dentro da zona de proteção deste último equipamento.

- Disjuntores são equipamentos de seccionamento automáticos instalados em subestações, usualmente acoplados a sistemas de proteção (sobrecorrente, subtensão e outros), que operam automaticamente em carga, com capacidade de interromper correntes de defeito.

2.3.3 Normas e Práticas de Aplicação de Dispositivos de Proteção e Manobra

Este item tem como objetivo realizar uma abordagem sucinta dos procedimentos de aplicação de Dispositivos de Manobra e Proteção em empresas de distribuição. As aplicações são fundamentadas na experiência e em boas práticas da engenharia, bem como a atual tendência de utilização desses equipamentos como recursos para a melhoria dos indicadores de continuidade coletivos e individuais.

a) Usualmente os critérios que regem a instalação de chaves fusíveis são:

- Instalação em locais de fácil acesso, com atenção especial da localização quando se trata de áreas rurais;
- A quantidade de chaves fusíveis em serie deve atender às restrições determinadas pela coordenação da seletividade dos elos fusíveis, usualmente no máximo de quatro dispositivos.
- Instalação de chaves fusíveis somente em ramais com mais de 3 transformadores ou comprimento maior do que 300 m.

b) Critérios de Instalação de Religadores

- Os religadores são utilizados para a manobra e proteção de alimentadores, tanto na saída das subestações como ao longo do linha.
- Os religadores devem ser dimensionados para suportar a corrente nominal e para interromper a corrente de curto-circuito máxima do seu ponto de instalação.
- A coordenação da proteção entre os dispositivos de proteção dos religadores deve ser atendida pelos religadores instalados em um determinado alimentador.

c) Critérios de Instalação de Seccionalizadores

- O seccionalizador deve ser instalado para proteção em locais da rede onde a corrente supera a capacidade de elos–fusíveis.
- O seccionalizador deve ser instalado para proteção quando a coordenação de elos fusíveis não atende às condições operativas especificadas.

2.4 MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO E TÉCNICAS DE BUSCAS

Este item tem como objetivo realizar um levantamento e uma análise das principais metodologias e técnicas da pesquisa operacional de otimização, tais como a da Programação Linear, Algoritmos Genéticos, Busca de Profundidade, Método Tabu e outros, bem como pesquisar a bibliografia sobre técnicas na alocação de dispositivos, chaves de proteção ou manobra, com a finalidade de melhoria dos indicadores de continuidade para o sistema elétrico.

2.4.1 Algoritmo Genético [WENYU (2004)]

Algoritmo genético (GA – Genetic Algorithm) é uma classe particular de algoritmos evolutivos que usam técnicas inspiradas pela biologia evolutiva de seleção natural de Darwin. Os elementos que definem um estado do problema formam uma população, representados por cromossomos. Estes, por sua vez, são representados por genes. Assim, utilizando-se alguns conceitos de hereditariedade como cruzamento, mutação e seleção natural dos mais aptos após algumas gerações, espera-se encontrar as melhores soluções.

Da pesquisa bibliográfica sobre esse tema, destacam-se as seguintes publicações:

- a) [DAVID (2009)] – Alocação Otimizada de Dispositivos de Manobras – Foi utilizado algoritmo genético para a alocação de chaves de manobras com o objetivo minimizar os indicadores técnicos e da energia não distribuída. A proposta estabelece os pontos de instalação das chaves de manobras e interligação ao longo dos alimentadores, levando a existência de chaves de manobras para a interligação com alimentadores socorro (fonte de alimentação alternativa). Foram consideradas funções-objetivo baseadas nos tempos de localização de defeito, reparo, taxas de faltas e nas cargas

instaladas. Não foi considerada a existência de dispositivos de proteção nos trechos analisados, de modo que a formulação estabeleceu que a ocorrência de faltas em qualquer um ponto causaria a interrupção de todos os clientes ao longo do alimentador. Com restrições econômicas foi incorporada a limitação do número de chaves a serem alocadas, porém não foram consideradas as questões técnicas de carregamento dos condutores e queda de tensão admissível.

- b) [RASI (2010)] – Alocação de Chaves Automatizadas – Foi proposta a metodologia de algoritmos genéticos e simulação de Monte Carlo para melhoria da confiabilidade do sistema através da alocação de chaves automatizadas de interrupção sob carga nos pontos mais favoráveis, considerando-se a minimização dos indicadores de continuidade DEC e FEC. A técnica utilizada considera a criação de vários cenários aleatórios na alocação das chaves automatizadas e posteriormente a aplicação do método de Monte Carlo para a simulação dos eventos de interrupção de falhas no sistema elétrico. A metodologia desenvolvida contemplou critérios técnico-econômicos buscando otimizar o desempenho dos indicadores, bem como o fluxo de caixa do investimento nas chaves. Os testes realizados propuseram a alocação de números variados de chaves para se validar a metodologia proposta, através da verificação da melhoria dos indicadores de continuidade. A técnica não considera trechos com características específicas, como trechos arborizados ou clientes especiais, e não utiliza as interrupções de falhas reais. Não foi especificado o tempo da simulação, possivelmente devido à complexidade do algoritmo.
- c) [Dezaki (2010)] – Optimized Protective Devices Allocation in Electric Power Distribution Systems Based on the Current Conditions of the Devices – A proposta da metodologia é realizar a alocação otimizada dos dispositivos de proteção para melhorar a FEC, baseada na instalação de dispositivos de corrente (chave fusível) ao longo do alimentador. O método utilizado tem como base o algoritmo genético usado para otimizar a função objetivo. As vantagens da metodologia são a redução dos riscos com a mudança dos dispositivos de proteção da rede, minimização de custos dessas alterações dos dispositivos de proteção e a melhoria dos indicadores de continuidade do sistema. No método proposto, o processo de otimização, o algoritmo verifica os locais sugeridos para instalar os dispositivos de proteção e compara a colocação

proposta dos dispositivos pelas condições atuais do alimentador. A cada estágio do dispositivo proposto, que é diferente da localização dos dispositivos atuais, impõe um fator de penalidade para o valor do objetivo. Apesar de no final de cada passo da otimização, o algoritmo comparar com o número total de dispositivos de proteção proposto com o atual, adiciona-se outro valor ao objetivo, a fim de mensurar os dispositivos adicionais necessários. A função objetivo foi composta pelo valor da FEC de cada dispositivo proposto em comparação ao atual e o custo dos dispositivos adicionais necessários para otimizar o sistema. Para ilustração do método, utilizou-se um alimentador real de distribuição de energia elétrica de 20 kV, linhas aéreas, três fios com uma conexão estrela aterrado / delta da subestação transformadora.

d) [DORNELES (2009)] – Otimização da Confiabilidade de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica; Uma abordagem considerando a seleção e alocação de dispositivos de proteção e manobras. O trabalho propõe o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para avaliação e otimização da confiabilidade de sistemas de distribuição. A melhoria na confiabilidade é obtida por meio da alocação de dispositivos de proteção contra sobrecorrentes, bem como de chaves de manobras. No trabalho foram propostas duas abordagens para o problema de otimização da confiabilidade. Na primeira – denominada otimização com objetivo único – a metodologia consiste na alocação otimizada e integrada dos dispositivos de proteção e manobras, visando à minimização de um indicador de confiabilidade associado à ocorrência de interrupções permanentes no fornecimento de energia.

A segunda propõe a caracterização da confiabilidade de forma mais ampla, considerando a ocorrência tanto de interrupções permanentes, quanto de interrupções temporárias.

Ambas as formulações resultam em modelos de programação não-linear, com funções objetivo descontínuas e não diferenciáveis, sujeitas a restrições não-lineares. Estas restrições refletem limitações técnicas e econômicas, tais como coordenação e seletividade entre os dispositivos de proteção, topologia do alimentador, número máximo de dispositivos disponíveis para alocação, entre outras.

Os desvios de otimização propostos consistem em problemas combinatórios, cujas soluções não podem ser obtidas por meio de algoritmos determinísticos em tempo viável. Desta forma, foi empregado o Algoritmo Genético Simples (AGS) na busca da

melhor solução do problema de otimização com objetivo único. O problema de otimização com duplo objetivo, por sua vez, requer uma técnica de busca mais sofisticada, sendo neste caso empregado o Algoritmo Genético Multiobjetivo (AGM). Como resultado do processo de busca efetuado pelo AGM, tem-se, ao invés de uma única solução, um conjunto de soluções ótimas. Desta forma, a determinação da solução mais adequada dentre as demais requer o emprego de um segundo mecanismo de tomada de decisão, que consiste em um Sistema de Inferência Nebulosa.

- e) [BURIAN (2009)] – Algoritmos Genéticos na Alocação de Dispositivos de Proteção de Distribuição de Energia Elétrica. Este método representa o circuito de distribuição por meio de uma árvore de recursão, em que cada nó da árvore corresponde a uma barra (nó). Tal opção possibilita intercalar o componente de proteção entre nós consecutivos. Por meio dessa forma de representação é possível percorrer o circuito e atingir toda a sua extensão, experimentando o seu comportamento operacional e colocando os elementos de proteção. Este conceito, associado ao Algoritmo Genético (AG), permite a varredura de todos os trechos do circuito, inserindo-se ou não os componentes de proteção, de acordo com a necessidade. Por intermédio dele, vislumbram-se diversas possibilidades de solução. Estas, por sua vez, atingem o resultado otimizado, dos índices de continuidade, dos custos de material e da manutenção.
- f) [CAMPITELLI (2007)] – Análises e estudos para alocação e ajustes de dispositivos de proteção em redes de média tensão de energia elétrica com geração distribuída. A formulação e solução do problema de alocação dos dispositivos de proteção considera que os dispositivos de proteção irão operar de forma seletiva e coordenada. O modelo matemático propõe a alocação e realocação otimizada de dispositivos de proteção e geradores distribuídos no alimentador, para melhoria dos índices de confiabilidade, sendo o trabalho uma extensão e melhorias do modelo proposto em Silva (2002) e Silva et al.(2004), que é obtido usando o conceito de energia não fornecida e dados históricos dos índices das faltas permanentes e temporárias no alimentador. É uma abordagem de problema de otimização combinatória com uma função objetivo não linear, não diferenciável, com variáveis reais e inteiras e um conjunto de restrições lineares. Neste modelo de alocação otimizada de dispositivos de proteção e geradores distribuídos, considera-se que os geradores distribuídos podem operar de forma ilhada dentro do

sistema de distribuição. Este método se restringem a sistemas que tenham no decorrer do alimentador geração distribuída, diferente a do proposto no estudo que trabalha com alimentadores radiais sem a geração distribuída.

2.4.2 Programação Linear Inteira Mista [OLIVEIRA (2009)]

A Programação Linear (PLIM) soluciona problemas de otimização nos quais a função objetivo e as restrições são todas lineares.

Se todas as variáveis do problema pertencerem ao conjunto dos números inteiros, temos uma subclasse da Programação Linear denominada de “Programação Inteira” (PI) ou “Programação Linear Inteira”.

Quando somente algumas das variáveis são inteiras e outras contínuas, temos a "Programação Inteira Mista" (PIM), na qual as variáveis que constituem a função objetivo são divididas em dois subconjuntos.

$$\text{--variáveis reais contínuas: } x = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]; x_i \in R \quad (2.11)$$

$$\text{--variáveis inteiras: } y = [y_1, y_2, y_3, \dots, y_n]; y_i \in N \quad (2.12)$$

Para uma exemplificação, a equação abaixo mostra um tipo de função objetivo.

$$\begin{aligned} & \text{Maximizar } Z = C_1x + C_2y \\ \text{sujeito a } & \begin{cases} x + y \leq C_3 \\ x \geq 0 \\ y \geq 0 \\ y \text{ inteiro} \end{cases} \end{aligned} \quad (2.13)$$

Para a solução dos problemas PLIM são propostas as seguintes metodologias [SCHMIDT (2009)]:

a) Cutting Methods (Gomory)

Resolve-se o problema considerando todas as variáveis contínuas;

Adicionam-se, sistematicamente, restrições secundárias para se alcançarem valores inteiros, ou seja, restrições que “cortam” partes do espaço de soluções que não contém pontos inteiros viáveis.

b) Search Methods (Enumeração Implícita, Branch and Bound)

Esses Métodos têm por princípio a enumeração (explícita ou implícita) de todos os pontos inteiros viáveis.

São aplicados testes para que somente uma (pequena) parcela dos pontos seja considerada explicitamente, mas que automaticamente leve em conta os demais pontos implicitamente.

c) Decomposição de Benders

Problema decomposto em sub-problemas de Programação Linear e Programação Inteira.

Programação Linear Binária [ZAMBONI (2002)], semelhante à programação linear, é dito binário pois apresenta somente valores 0 (zero) ou valor 1 (um). Pode-se interpretar essa relação como: ativo (valor 1) e inativo (valor 0).

Geralmente os problemas de otimização não se encontram na forma binária, sendo necessária uma conversão decimal de bases para a base binária. Para a conversão dos números decimais para binários usam-se as equações (2.14) e (2.15).

$$2^{k+1} \geq u_k + 1 \quad (2.14)$$

$$(x_k)_{10} = \sum_{p=0}^k 2^p \cdot (y_{kp})_2 \quad (2.15)$$

Nota-se que, ao mudar de base decimal para binária, há um aumento de variáveis controláveis; contudo, esse aumento proporciona algumas vantagens:

- Eliminação dos erros de arredondamentos pois só realiza operações de adição e comparação;
- Manutenção da matriz de restrições; e

- Necessidade de reduzido espaço de memória em aplicação em computador, pois armazena apenas as soluções ótimas.

Da pesquisa bibliográfica sobre esse tema, destacam-se as seguintes publicações:

- a) [ARTURO (2010)] – Propõe uma metodologia de alocação otimizada de dispositivos de proteção em redes de distribuição radiais, visando à melhoria dos indicadores de confiabilidade utilizados no Brasil, ou à minimização da energia não fornecida devido à incidência de faltas permanentes e/ou temporárias visando à confiabilidade expressa pelos indicadores DEC e FEC. A proposta resultou em um modelo de Programação Não-Linear Inteiro Misto (PNLIM), com variáveis reais e binárias, e restrições lineares. Devido à explosão combinatorial resultante dos muitos pontos candidatos à alocação, este método foi inviabilizado para a alocação, na qual posteriormente foi aplicado o algoritmo genético (AG) para a obtenção dos pontos ótimos. O processo de otimização visa a localizar os dispositivos, de modo que o menor número de consumidores ou quantidade de carga seja interrompido, quando da ocorrência de uma falta em um ponto qualquer da rede. A modelagem do problema considera uma função objetivo baseada nos índices de faltas permanentes e temporárias de cada trecho do alimentador e ramais, caracterizados também por seus comprimentos, número de consumidores, cargas instaladas e tempos de restabelecimento.

2.4.3 Recozimento Simulado (Simulated Annealing) [ZAMBON (2006)]

É uma meta-heurística proposta por Kirkpatrick e Vecchi, em 1983. O recozimento (annealing) é um processo metalúrgico em que o material é aquecido até uma alta temperatura, e resfriado lentamente, até atingir uma estrutura cristalina estável. Em altas temperaturas, as partículas do material estão dispostas de uma forma randômica. Conforme o material se esfria, as partículas se rearranjam numa estrutura reticulada, que é o estado mínimo de energia. É um algoritmo de busca de soluções capaz de escapar de ótimos locais. A cada iteração, uma nova solução é gerada e comparada com a solução atual. Em caso de melhoria, o novo estado é aceito.

Da pesquisa bibliográfica sobre esse tema, destaca-se a seguinte publicação:

a) [BILLINTON (1996)] – Com o objetivo de otimizar as chaves de manobras utilizando o algoritmo Simulated Annealing, foi proposta uma metodologia visando a definir a quantidade de chaves de manobras e os locais de sua instalação no sistema de distribuição pela temperatura da condutibilidade dos dispositivos. A proposta visa à redução do custo estimado da energia não fornecida (END), por causa das interrupções do sistema elétrico. A função objetivo considera a carga, taxas de faltas, custo da END, o restabelecimento, custos de aquisição, assim como a instalação e a manutenção. O sistema considera na simulação a mudança da temperatura utilizando um algoritmo cuja formulação é baseada na física estatística (algoritmo Metrópolis). O aumento da temperatura faz com que sejam considerados os sistemas vizinhos, de modo que a configuração do sistema pode ser alterada de uma configuração para outra. Se o movimento resultar em nível energético mais baixo, então a configuração é válida. Caso contrário, a validação da nova configuração é definida probabilisticamente, sendo proporcional à temperatura do sistema. Consequentemente, diferentes configurações são mais facilmente aceitas nas altas temperaturas, de modo que nas temperaturas mais baixas somente são consideradas configurações que ocasionam diminuição da função objetivo.

2.4.4 Colônia de Formigas (ACS – Ant Colony Systems) [TENG (2003)]

É um mecanismo de busca heurística baseado em uma população de agentes (formigas), que utiliza mecanismos de adaptação, cooperação e paralelismo, visando à resolução do problema de obtenção de alimentos para o formigueiro. Inicialmente um número de formigas percorre aleatoriamente as proximidades do formigueiro em busca do alimento.

O método consiste no procedimento de cada formiga, ao percorrer o seu caminho, de depositar uma substância chamada feromônio, formando um caminho ou rastro de feromônio. Posteriormente, as formigas subsequentes seguem o caminho com maior concentração de feromônio, ou seja, onde há a maior passagem de formigas. Um exemplo da aplicação do método de otimização por colônia de formigas foi utilizado no problema da realocação de chaves em redes de distribuição.

Da pesquisa bibliográfica sobre esse tema, destaca-se a seguinte publicação:

a) [ORLANDO (2010)] – Seleção e Alocação Otimizada de Dispositivos de Proteção e Manobras – Com o objetivo de melhoria da confiabilidade de sistemas de distribuição de energia elétrica, na utilização do algoritmo Colônia de Formigas, foram determinados, de forma otimizada, os tipos e locais de instalação dos dispositivos de proteção contra sobrecorrente e manobras em alimentadores de distribuição. A proposta leva um conjunto de seções candidatas do alimentador e um número específico de dispositivos de proteção e manobras. O problema de otimização proposto neste trabalho consiste na determinação da combinação de tipos e localizações desses dispositivos, que resulte no mínimo valor da função objetivo definida pelos indicadores de confiabilidade SAIDI (baseado em consumidores) ou ASIDI (baseado em carga). A formulação das funções objetivo se baseia na aplicação de construção das soluções, inicialmente as formigas constroem soluções candidatas. Cada formiga parte de uma solução vazia (colônia) e adiciona um componente factível (estado) a cada estágio, até que uma solução completa seja gerada.

2.4.5 Busca Tabu [SEDANO (2006)]

O termo tabu (taboo) significa coisas que são sagradas e que, portanto, constituiriam um certo risco, se abordadas. Um risco a ser evitado, por exemplo, seria a escolha de um caminho que levasse inclusive a um problema sem solução. Tabus, geralmente, são transmitidos por meio de memória social que estão sujeitas a alterações ao longo do tempo.

A busca tabu possui a habilidade de guiar o processo de busca de métodos iterativos de melhoria. Assim sendo, ela forneceria meios de explorar o espaço de soluções além dos pontos em que a Heurística convencional encontraria ótimos locais. A busca tabu procura superar a otimização local, baseando-se em uma função de avaliação que escolhe, a cada interação, o movimento com maior valor de avaliação na vizinhança da solução corrente, em termos de valor de função objetivo e restrições tabu.

A lista tabu é introduzida no sentido de guardar características dos movimentos realizados, para evitar possíveis retornos a soluções já visitadas (restrições). Assim, a busca é restrita por uma estratégia de proibição, cuja função é controlar e atualizar a lista tabu, objetivando evitar que sequências de soluções sejam repetidas, até um número pré-determinado de iterações e, com isso, induz à exploração de novas regiões.

As principais características da Busca Tabu básica são: estabelecer um sistema de codificação eficiente, um mecanismo de transição entre soluções vizinhas, memória adaptativa (guarda elementos importantes da história da busca), critérios de aspiração e finalização, estratégias de busca baseadas em memória (exploram características de boas soluções e exploram regiões promissoras) e memórias de curto prazo.

Há uma forma alternativa dessa metodologia, que é a Busca Tabu Reativa, cujas peculiaridades são: memória de longo prazo, memória de curto prazo de dimensão variada (tabu list) e mecanismo de escape. As aplicações da Busca Tabu Reativa são em casos de estruturas de busca de soluções que apresentam mais de uma solução ao mesmo tempo.

Da pesquisa bibliográfica sobre esse tema, destaca-se a seguinte publicação:

- a) [ALYSSON (2010)] – propuseram a alocação de chaves de manobra com utilização de algoritmo construtivo e método baseado em busca tabu. A proposta do trabalho é realizar a alocação de chaves para suprimentos de cargas. Dada certa situação de falha, podem-se utilizar chaves instaladas nos alimentadores principais para isolar a falha e impedir a sua propagação, diminuindo-se o número de consumidores afetados. Além disso, podem-se utilizar chaves em alimentadores normalmente abertos para servir consumidores que ficaram isolados. A técnica propõe que todas as demandas dos nós alcançados pela propagação da falha são dadas como não servidas, nomeada como área escura. A abertura de chaves cria uma outra categoria de nós, que são aqueles que não pertencem à área escura. Esses nós são servidos apenas se existe uma chave em um alimentador de suporte que possa ser fechada, conectando-os a alguma área atualmente servida. A técnica se mostra muito complexa, porém descreve técnicas de limitação de forma a garantir a eficiência dos métodos heurísticos e está focada na alocação de chaves para manobras em outros alimentadores.

2.4.6 Algoritmo Memético (Memetic Algorithm) [GUERRA (2008)]

Embora seja análogo ao Algoritmo Genético, o Algoritmo Memético não está somente limitado aos conceitos darwinísticos de seleção de bons indivíduos, mutação e recombinação. No caso do Algoritmos Meméticos, podem existir indivíduos pouco adaptados geneticamente ao meio em que nascem, porém com as trocas de informações entre outros indivíduos, eles podem se

tornar mais adaptados e, além disso, também transmitir essa adaptação para os descendentes (evolução cultural).

O princípio básico do Algoritmo Memético é a seleção dos indivíduos mais bem adaptados para a reprodução e recombinação, isto é, proporcionar filhos mais bem adaptados em relação aos pais. Estes, por sua vez, tendem a ocupar os locais de indivíduos menos adaptados, aumentando a adaptabilidade de toda a população. Após algumas gerações pode-se obter uma população cuja maioria esteja bem adaptada.

Da pesquisa bibliográfica sobre esse tema, destacam-se a seguinte publicação:

- a) [LAURA (2013)] – Abordagem Multiobjetivo para Alocação de Chaves em um Sistema de Distribuição de Energia Elétrica – que apresenta um algoritmo memético multiobjetivo para alocar chaves seccionadoras e de manobra, automáticas e manuais, para minimizar custos de instalação e de energia não distribuída. A proposta determina que cada indivíduo da população é uma solução candidata do problema, o qual é representado por uma sequência de genes denominados cromossomos. Cada cromossomo é definido por dois vetores de inteiros que representam a localização das chaves seccionadoras e chaves de manobra. Cada posição do cromossomo representa um arco candidato a receber o dispositivo. A seleção dos indivíduos é feita de acordo com a estrutura da população, na qual todo par de indivíduos líderes e subordinados participa. O método utiliza as tradicionais técnicas de escalarização para resolver problemas de otimização multiobjetivo. Nesse método, uma das funções objetivo originais é minimizada, enquanto as demais são transformadas em restrições. A aplicação do uso de uma população estruturada foi motivada pelo fato de o algoritmo realizar sucessivas avaliações da confiabilidade da rede, uma tarefa com um custo computacional alto. A população estruturada possui um número menor de indivíduos, comparada às estruturas convencionais dos algoritmos populacionais; dessa forma, reduzindo o esforço computacional e permitindo o estudo em redes de grande porte, sem perder a qualidade da solução final.

2.4.7 Busca em Profundidade [OLIVEIRA (2009)]

A técnica de Busca em Profundidade, ilustrada na Figura 2.1, possui como vantagem a maior sensibilidade às multivariáveis, proporcionando um índice de mérito mais apurado.

Figura 2.1 – Técnica em Profundidade

A partir do nó raiz da árvore de busca, percorre-se a árvore através de um único caminho, até que a solução do problema seja alcançada ou que uma decisão de interromper o caminho seja tomada. Um caminho é interrompido quando se alcança um nó terminal, ou um nó que representa um retorno a um estado anterior ou quando se alcança um estado considerado pior (por exemplo, de maior custo) a uma solução de referência. Em qualquer desses casos, realiza-se um procedimento de retrocesso (backtrack), retornando-se ao nó imediatamente anterior para a geração de um outro caminho. A Figura 2.2 apresenta o desenvolvimento da árvore de busca quando esta técnica é utilizada.

Figura 2.2 – Árvore de Busca em Profundidade

a) Busca pela melhor escolha (best-first search) [OLIVEIRA (2009)]

Esta técnica combina as vantagens dos processos de busca em profundidade e de busca em amplitude. Em cada passo do processo avaliam-se todos os nós possíveis de serem expandidos pela aplicação de uma função heurística de avaliação específica para o problema. A busca é então continuada a partir do nó, dentre todos aqueles gerados até então, que se apresente como o mais promissor, ou seja, aquele que apresenta o maior potencial em direção à solução do problema. A Figura.2.3 apresenta o desenvolvimento da árvore de busca.

Figura 2.3 – Busca pela Melhor Escolha

b) Método Gradiente (Gradient Search) [OLIVEIRA (2009)]

Esta busca de profundidade é uma variante da técnica de Hill Climbing. Neste caso, em cada nível da árvore de busca, todos os possíveis nós sucessores são avaliados, e o melhor deles é escolhido para ser expandido, desde que represente um estado que seja melhor que o estado corrente.

A técnica de Hill Climbing é um algoritmo iterativo que começa com uma solução arbitrária para um problema, em seguida tenta encontrar uma melhor solução, mudando incrementalmente um único elemento da solução. Se a mudança produz uma solução melhor, é considerada a nova solução, repetindo até que não haja mais melhorias a ser encontradas.

3. DIRETRIZ METODOLÓGICA

3.1 MOTIVAÇÃO

O órgão regulador dos serviços de eletricidade no Brasil - ANEEL, tem publicado resolução visando a melhoria dos indicadores de continuidade de serviços de distribuição de energia, incluindo recentemente compensação por transgressões dos limites dos indicadores pagas diretamente e automaticamente aos consumidores.

Uma das providências mais usuais de promover melhoria nesse sentido é a aplicação de dispositivos de proteção e manobra, como chaves fusíveis e religadores automáticos, que permitem limitar a área afetada por falhas.

O item 2.4 apresenta dezenas de trabalhos para alocação dos dispositivos de proteção e manobra, o que ressalta a importância deste tema, mas muitos dos trabalhos desenvolvidos não tem sido utilizados no dia a dia das Distribuidoras. O autor considera que estes trabalhos utilizam técnicas complexas para a alocação dos DPM, o que dificulta bastante sua aplicação. Este fato motivou a busca de um algoritmo simples e de fácil utilização.

Verifica-se que atualmente a aplicação desses dispositivos, em muitos casos, a alocação e a quantificação são embasadas em critérios empíricos, formuladas pela experiência das equipes técnicas, devidamente orientada pela frequência de ocorrências de faltas e por reclamações dos clientes.

Complementarmente é importante ressaltar, que a seletividade e coordenação de dispositivos de proteção e manobra instalados em série é uma das principais questões a serem tratadas para a aplicação adequada desses dispositivos.

Nesse cenário, a motivação central desta pesquisa é a busca de uma metodologia ágil e objetiva para aplicação de dispositivos de proteção e manobra em alimentadores primários, para melhoria dos indicadores de continuidade.

Assim, objetivo desta pesquisa é desenvolver uma metodologia para alocação dos DPM em um dado alimentador, incluindo troncos e ramais, de forma que a ocorrência de um defeito no sistema provoque interrupção de fornecimento à menor quantidade de clientes possível e, portanto, a otimização do FEC.

3.2 CONCEITOS

3.2.1 Alimentadores Primários

A pesquisa foca o desempenho de alimentadores primários de redes de distribuição, no que diz respeito à localização de dispositivos de proteção para a melhoria da continuidade de serviço.

Alimentadores primários são entendidos, neste texto, como sendo redes radiais, arborescentes, constituídas de um tronco, do qual derivam ramais que atendem consumidores em tensão primária e supridos por transformadores de distribuição MT/BT. Um alimentador é suprido por uma subestação de distribuição, a qual é conectado, por meio de um Dispositivo de Proteção e Manobra (DPM) que é constituído por disjuntor equipado com um dispositivo de sobre corrente, que o aciona quando houver uma transgressão do limite de corrente pré-estabelecido, usualmente motivada por um defeito.

3.2.2 Alocação de Dispositivo de Proteção e Manobra

Os DPM podem ser entendidos como sendo uma chave que opera sob curto circuito, dotada de sistema de proteção contra sobre corrente. Podem ser constituídos de disjuntores, religadores, seccionadores ou chaves fusíveis, e ser instalados ao longo de um alimentador para limitar a área afetada por uma interrupção do fornecimento provocada por uma falha.

Um alimentador com apenas o DPM instalado na subestação, portanto no início de seu percurso, apresenta interrupção em todos os consumidores que atende, no caso de ocorrer uma falha que provoque sobre corrente, em qualquer ponto de sua extensão.

Quando um DPM é instalado em algum outro ponto do alimentador, ficam definidas 2 regiões de consumidores, uma a montante desse DPM e outra a jusante, conforme ilustrado na figura 3.1.

Figura 3.1 - Alocação de DPM no sistema

Nota-se que o DPM pode ser localizado tanto no tronco como no ramal.

Observa-se que, após a instalação do “DPM 1”, a ocorrência de um defeito na região a jusante não provoca a interrupção do fornecimento aos clientes situados na região a montante, uma vez que o DPM da subestação não opera nesse caso, tendo como premissa que os dispositivos estarão seletivos e coordenados.

Assim, a cada novo DPM instalado observa-se uma melhora na continuidade do serviço, uma vez que o fornecimento de energia de clientes localizados a montante é preservado, quando ocorre uma falta a jusante.

3.2.3 Taxa de Falha

Os desligamentos são provocados tanto por falhas originadas por interferências externas, como por exemplo: vegetação, ou defeitos no próprio sistema, tais como mau funcionamento de para-raios ou de transformadores de distribuição. Usualmente, fundamentando-se em séries históricas, são atribuídos aos alimentadores “Taxas de Falha (T_f)”, que expressam, em vezes/ano/km, a quantidade de vezes que ocorre um defeito que provoca um desligamento no alimentador, por unidade de comprimento, num período.

Assim, a probabilidade de ocorrência de defeito é determinada por meio de taxas de defeito associadas a cada trecho do alimentador.

3.2.4 Densidade de Clientes

É comum expressar a quantidade de clientes atendidos por um alimentador pela “Densidade Linear de Clientes (δ)” que expressa a quantidade de clientes conectados ao alimentador por unidade de comprimento, (NC/km).

Assim como a taxa de falha, a densidade de clientes é, no caso geral, função do trecho do alimentador. Entretanto, por facilidade, na apresentação das diretrizes metodológicas, ambos serão considerados constantes e iguais a T_f e δ para todos os trechos. Para os exemplos serão considerados valores não uniformes.

3.2.5 Melhoria da Continuidade pela Alocação de um DPM

Cada DPM instalado ao longo do alimentador determina uma região a montante e outra a jusante a ele associada. A região a montante associada a um DPM instalado é a parte do alimentador, a montante dele, até o outro DPM, situado imediatamente a montante. A região a jusante associada a um DPM instalado é a parte do alimentador, a jusante dele, até o outro DPM, situado imediatamente a jusante, conforme ilustrado na figura 3.2.

Figura 3.2 – Região do DPM

Observa-se que a instalação de DPM 2 elimina a interrupção do fornecimento dos clientes de sua “região a montante do DPM 2” provocadas por defeitos na “região a jusante do DPM 2”.

Generalizando e considerando a taxa de defeito T_f , a densidade de clientes δ , e ainda que $L_M(i)$ e $L_J(i)$ são, respectivamente, os comprimentos das parcelas do alimentador nas regiões a montante e a jusante associadas a DPM(i), constata-se que:

a instalação de um DPM(i) elimina a interrupção de $T_f \times L_J(i)$ vezes por ano (correspondente aos defeitos que ocorrem no trecho a jusante de DPM(i)), dos $\delta \times L_M(i)$ clientes que se localizam na região a montante associada a DPM(i).

3.3 DIRETRIZ METODOLÓGICA

3.3.1 Linhas Gerais

Considerando os aspectos tratados, a diretriz metodológica para alocação de DPMs ao longo de um alimentador, de forma a diminuir a interrupção do serviço, consiste em:

- considerar um alimentador sem DPMs ao longo de sua trajetória, com pontos discretos que potencialmente possam abrigar um DPM.
- instalar o DPM (1) na localização onde se verifica a maior quantidade de clientes que deixam de ser interrompidos por defeitos ocorridos, ou seja, que o produto $T_f \times L_J(1) \times \delta \times L_M(1)$ seja máximo.
- instalar, sequencialmente os DPM(i), $i=1,n$, sucessivamente, buscando maximizar o produto $T_f \times L_J(i) \times \delta \times L_M(i)$ e considerando que os $i-1$ DPM já instalados, não possam ter localização alterada.
- o processo se encerra ao instalar o DPM(j+1), $j < n$, quando o ganho de quantidade de clientes que deixam de ter o fornecimento interrompido correspondente à instalação do DPM (j+1) em relação à instalação do DPM (j) é menor do que um valor pré-estabelecido.

Posteriormente à alocação do DPM(j) as localizações de DPMs é ajustada considerando restrições físicas; como por exemplo a existência de DPM instalado próximo de algum ponto previsto no processo ou local inacessível.

3.3.2 Desempenho Máximo de Alimentador

O Desempenho Máximo de um Alimentador (DMA) com respeito à melhoria de índices de continuidade é um conceito associado a uma configuração de DPMs, definida pela quantidade e alocação de cada DPM no alimentador, que resulta no melhor índice de interrupção de clientes.

A metodologia proposta se fundamenta em gerar alternativas de configurações de DPMs em um alimentador, calcular os correspondentes DMAs e selecionar aquela mais conveniente.

Para ilustrar o desenvolvimento da metodologia considera-se um caso simplificado com as premissas a seguir, que posteriormente será generalizado:

- o alimentador é constituído de um tronco sem ramais.
- os clientes são uniformemente distribuídos ao longo do alimentador.
- a taxa de falha é constante para todo alimentador.
- o objetivo é minimizar a quantidade de clientes afetados por interrupções decorrentes de falhas.
- há um disjuntor instalado na subestação que supre o alimentador.
- os DPMs podem ser instalados em $n - 1$ postes ao longo do alimentador, sendo que no caso dessa ilustração $n = 4$. equidistantes um do outro e o primeiro da subestação já com a proteção instalada.
- cada trecho do alimentador entre 2 postes sucessivos atende $Cx(j)$ clientes, no exemplo ilustrativo $Cx(1) = Cx(2) = Cx(3) = Cx(4) = 1$ clientes.
- cada trecho do alimentador entre 2 postes sucessivos apresenta talha de falha associada ao comprimento de $Cy(k)$ quilômetros, no exemplo ilustrativo $Cy(1) = Cy(2) = Cy(3) = Cy(4) = 1$ km.

Considere-se, então, que inicialmente não haja qualquer DPM instalado ao longo do alimentador, como mostrado na Figura 3.3 e assim, verifica-se que a quantidade de clientes afetados por interrupções em cada trecho é aquela apresentada na Tabela 3.1

Figura 3.3 – Alimentador com disjuntor na subestação

Falha no Trecho	T1	T2	T3	T4	Total
Quantidade de Clientes Afetados	4	4	4	4	16

Tabela 3.1 – Risco de Perda de clientes

Verifica-se que a cada evento de falha, o disjuntor da subestação opera e realiza a interrupção, com a consequente perda dos 4 clientes, que representa o total de clientes. Com os 4 possíveis eventos de falha, há perda de 4 clientes 4 vezes, ou seja, nessa configuração (sem DPM ao longo do alimentador) o risco do sistema é o desligamento dos clientes afetados, no caso 16 clientes afetados, conforme ocorram as falhas.

Pode-se expressar este risco como sendo o Fator Inicial (FI) de interrupção no serviço de clientes calculado pelo produto do comprimento total do alimentador (L_{TOTAL}) pela quantidade de clientes do alimentador (C_{TOTAL}). Nota-se que o comprimento está associado a taxa de falha e a densidade de clientes.

$$FI = \frac{C_{TOTAL} \cdot L_{TOTAL}}{\text{FATOR INICIAL}} \quad (3.1)$$

Ao alocar 1 (um) dispositivo de proteção, em n1, n2 ou n3, reduzem-se os riscos de interrupção de clientes afetados por eventos de falhas, conforme se observa na Tabela 3.2.

A Figura 3.4 ilustra a alocação de um DPM no poste n1, sucessivamente será feita a alocação nos postes n2 e n3.

Figura 3.4 – Representação da alocação

	Falha no Trecho	T1	T2	T3	T4	Quantidade de Clientes Afetados
Poste com DPM	DJ	4	4	4	4	16
	n1	4	3	3	3	13
	n2	4	4	2	2	12
	n3	4	4	4	1	13

Tabela 3.2 – Quantidade de Clientes Afetados por Interrupções devidas a falhas para cada alocação de 1 DPM

Assim, o fator inicial de 16 clientes afetados com a proteção apenas ao disjuntor da subestação, passa a ser de 13 clientes afetados quando há alocação de um dispositivo de proteção e manobra (DPM) alocado em n1, ou de 12 clientes afetados, se, ao invés do n1, aloca-se o dispositivo em n2; ou 13 clientes afetados se em n3.

Assim, define-se o fator de clientes afetados para cada situação de alocação da chave pela expressão:

$$Fator(P_i) = \frac{C_{TOTAL} \cdot L_{TOTAL}}{FATOR\ INICIAL} - \underbrace{\sum_{j=1}^i C_{x(j)} \cdot \sum_{k=i}^n C_{y(k)}}_{FATOR\ VARIÁVEL} \quad (3.2)$$

Onde,

$Fator(p)$	fator de Clientes afetados com 1(um) DPM na posição (P_i).
n :	postes.
C_{TOTAL} :	quantidade total de clientes no alimentador.
L_{TOTAL} :	comprimento total do alimentador.
$Cx(j)$:	somatórios dos clientes afetados na região a montante da posição (P_i).
$Cy(k)$:	somatórios das taxas de falhas, no período, esperados da região a jusante da posição (P_i).

Sendo que, o fator inicial - FI é uma característica constante de cada alimentador, defini-se Índice de Mérito IM (i), associado a alocação de um DPM em cada posição (i).

$$IM(i) = \underbrace{\sum_{j=1}^i Cx(j) \cdot \sum_{k=i}^n Cy(k)}_{\text{FATOR VARIÁVEL}} \quad (3.3)$$

Para o caso exemplo, o maior IM(i) corresponde $i = 2$, conforme figura 3.5, onde o DPM alocado está em n_2 , e oferece o menor risco de quantidade de clientes afetados, ou seja 12 clientes, conforme a Tabela 3.2.

Figura 3.5 – Representação da Metodologia

Ao melhor IM(i) denomina-se IMax(n) representada pela expressão: $IMax(n) \rightarrow \{ \text{Maximização } IM(i) = \sum_{j=1}^i Cx(j) \cdot \sum_{k=i}^n Cy(k) \text{ para } (i = 1, n) \}$. A quantidade máxima pré-estabelecida de DPMs que podem ser instalados denomina-se DPM_T . Assim, o melhor IM (i) é aquele que apresenta o maior valor dentre os produtos da equação 3.3, ou seja, deve ser maximizado o produto.

A cada um DPM(i) alocado adicionalmente haverá um índice de mérito $IMax(i)$ associado, de forma que $\sum Cx(j)$ abranja os consumidores dos trechos da região a montante do DPM e o $\sum Cy(k)$ abranja todas as taxas de falha da região a jusante do DPM.

O desempenho do alimentador, quanto à continuidade, é definido como sendo o somatório dos índices de méritos ($IMax$) associados a cada DPM adicionado ao alimentador. Por sua vez, o desempenho máximo do alimentador (dma), para uma determinada quantidade de DPMs, está associado à configuração desses DPMs, que resulta na máxima continuidade de fornecimento de energia que representa o menor risco de interrupção do serviço a clientes, provocado por falhas.

A Figura 3.3 mostra um alimentador com 3 DPMs alocados sucessivamente nos postes n1, n2 e n3 e o dma correspondente, cuja valor é a soma das 3 parcelas de $IMax(i) = \sum_{j=1}^i Cx(j) \cdot \sum_{k=i}^n Cy(k)$ para $(i = 1, n)$, ou seja: $dma = IMax(1) + IMax(2) + IMax(3)$.

Figura 3.6 – Representação dos índices de méritos

$$dma = \underbrace{\sum_{i=1}^{DPM_T} IMax(i)}_{\text{CONFIABILIDADE}} \quad (3.4)$$

Para efeito de normalização, define-se a variável DMA

$$DMA = \frac{dma(\sum_{i=1}^{DPM_T} IMax(i))}{FI(C_{TOTAL} \cdot L_{TOTAL})} \quad (3.5)$$

3.3.3 Exemplo de Aplicação do Conceito de DMA

Como ilustração da aplicação do conceito de DMA, a Figura 3.7 ilustra um alimentador, onde devem ser instalados $q \text{ DPMs} = 2$. A questão é determinar a localização dos DPM para maximizar o ganho com a redução da quantidade de consumidores afetados por interrupção. Assim, ao se instalar o primeiro DPM é testado o desempenho do alimentador para cada uma das posições (postes), posteriormente é selecionada a posição que oferece o melhor índice de mérito e consequentemente o IMax (1).

Figura 3.7 – Alimentador exemplo (60 clientes e 6 km comprimento)

Onde:

C – representa a quantidade de clientes no trecho;

L – representa o comprimento em km do trecho;

O valor do Fator Inicial (FI) que corresponde à situação onde não há DPM no alimentador, exceto o que está instalado na subestação, é :

$$FI = C_{TOTAL} \cdot L_{TOTAL} \quad (3.6)$$

$$FI = C_{TOTAL} \cdot L_{TOTAL} = (10 + 20 + 20 + 10) \cdot (1 + 1,5 + 1,5 + 2) = 360$$

consumidores*km

O valor do DMA é zero para um alimentador com apenas a proteção no disjuntor da subestação, à medida que novos DPMs vão sendo instalados, o DMA se eleva.

As Figuras 3.8a a 3.8c apresentam o alimentador com 1 DPM nos postes 2, 3 e 4 , seguidas dos correspondentes Índices de Mérito:.

a) DPM no poste 2

Figura 3.8a – Proteção alocada na barra 2

Consumidores Montante = 10

Comprimento Jusante = $(1,5 + 1,5 + 2)$

$$IM_2 = 10 \cdot (1,5 + 1,5 + 2) = 50 \text{ consumidores*km} \quad (3.7)$$

b) DPM no poste 3

Figura 3.8b – Proteção alocada na barra 3

$$IM_3 = (10 + 20) \cdot (1,5 + 2) = 105 \text{ consumidores*km} \quad (3.8)$$

c) DPM no poste 4

Figura 3.8c – Proteção alocada na barra 4

$$IM_4 = (10 + 20 + 20) \cdot (2) = 100 \text{ consumidores*km} \quad (3.9)$$

Portanto, a alternativa com melhor desempenho é a instalação do DPM na barra 3 , pois apresenta a menor quantidade de clientes interrompidos, onde $IM(3) = IM_{Max}(1)$.

Para alocar o segundo DPM devem-se considerar o DPM já alocado e proceder o cálculo de índice de mérito para cada barra candidata.

As Figura 3.9a e 3.9b apresentam os circuitos com a alocação de DPM adicional nos postes 2 e 4 respectivamente, seguidas dos cálculos dos correspondentes índices de mérito.:

a) DPMs nos postes 2 e 3

Figura 3.9a – Proteção alocada na barra 2 e 3

Consumidores Montante = 10 e Comprimento Jusante = 1,5

$$IM_{23} = 10 \cdot 1,5 = 15 \text{ consumidores*km} \quad (3.10)$$

b) DPMs nos postes 3 e 4

Figura 3.9b – Proteção alocada na barra 3 e 4

$$IM_{34} = (20) \cdot (2) = 20 \text{ consumidores*km} \quad (3.11)$$

Portanto, a alternativa com melhor desempenho é a instalação do segundo DPM na barra 4, pois apresenta a menor quantidade de clientes interrompidos, onde $IM(34) = IM_{Max}(2)$.

Consideradas as duas instalações de DPM, o dma resultante será dado por:

$$dma = \underbrace{\sum_{n=1}^q IMax_{(n)}}_{\text{CONFIABILIDADE}} = IMax_{(1)} + IMax_{(2)} \quad (3.12)$$

$$dma = 105 + 20 = 125 \text{ consumidores*km}$$

Que normalizado é :

$$DMA = \frac{dma(\sum_{n=1}^q IMax_{(n)})}{FI(C_{TOTAL} \cdot L_{TOTAL})} = \frac{(IMax_{(1)} + IMax_{(2)})}{C_{TOTAL} \cdot L_{TOTAL}} \quad (3.13)$$

$$DMA = \frac{105 + 20}{60 * 6} = \frac{125}{360} = 0,347$$

4. METODOLOGIA PROPOSTA

4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os conceitos e diretrizes metodológicas apresentados anteriormente descrevem a linha de solução proposta para a questão de alocação de DPMs num alimentador primário, ilustrando por meio de exemplos simplificados, a forma de obtenção dos resultados.

Os exemplos anteriores consideram apenas os consumidores a montante e comprimento a jusante, sem que haja alteração do algoritmo é possível ampliar outras forma de uso, por exemplo: substituir as variáveis a montante, o número de consumidores, pelas potências médias, multas de FIC etc ou mesmo associando estas variáveis, ou associar as variáveis a jusante, o comprimento, com ocorrências de falha do sistema etc.

A base da metodologia, que é a busca em profundidade, realiza de forma sequencial a busca dos melhores locais para instalação de DPM, considerando, a cada operação de alocação, a permanência daqueles já instalados nos passos anteriores.

A simplicidade da técnica de árvore de busca em profundidade, utilizada como motor do processo de otimização, faz com que a cada nível da árvore de soluções, analisem-se todas as n possibilidades e, posteriormente, escolha-se a melhor solução. Após essa escolha em um dado nível, restará $n-1$ “níveis-filhos” que deverão ser analisados analogamente ao “nível-pai”. A Figura 4.1 a seguir exemplifica o procedimento.

Figura 4.1 – Níveis de Busca em Profundidade

(Nota: A Trajetória Otimizada Está em Vermelho.)

4.2 ESTRUTURA METODOLÓGICA

A estrutura que orienta a execução dos procedimentos da metodologia proposta é composta pelos seguintes Blocos, que serão detalhados nos itens a seguir:

- Bloco 1 – Base de Dados

Contém os elementos necessários para caracterizar a rede física e operacionalmente, bem como caracterizar os atributos de consumo dos clientes e os parâmetros econômicos envolvidos. Também neste Bloco são dadas as características dos DPMs a ser considerados;

- Bloco 2 – Caracterização do Estudo – Dados Gerais

Define a quantidade máxima de DPMs, e a natureza dos indicadores/parâmetros a otimizar, bem como os parâmetros para finalizar o processo como limites de saturação, etc.

- Bloco 3 – Geração de Alternativas de alocação de DPMs

Neste Bloco, são efetivamente realizadas as propostas de alocação de DPMs e calculados os índices de mérito e índice de desempenho máximo da alternativa.

Internamente a esse Bloco está o algoritmo de otimização de busca em profundidade.

- Bloco 4 – Análise e Seleção (otimização) das Alternativas de alocação de DPMs

Uma vez propostas as alternativas, neste Bloco é selecionada aquela que se mostra mais adequada.

- Bloco 5 – Resultados

Finalizando o processo, este Bloco emite os relatórios e gráficos contendo os resultados obtidos para alocação de DPMs em todas as situações propostas.

A Figura 4.2 apresenta o diagrama do processo.

Figura 4.2 – Diagrama do processo

4.3 BLOCO 1 - BASE DE DADOS

Este Bloco contém os elementos, basicamente, de três naturezas, a serem descritos a seguir:

a) Dados da rede de alimentadores

- quantidade e código de identificação de alimentadores
- topologia dos alimentadores em estudo, incluindo os postes onde potencialmente é possível instalar um DPM;
- comprimento dos trechos entre postes;
- taxas de falha dos trechos;
- localização dos DPMs existentes;

- localização dos DPMs projetados;

b) Dados de clientes

- quantidade de clientes atendidos em MT em cada trecho de cada alimentador;
- quantidade de clientes atendidos em BT por transformadores de cada trecho de cada alimentador;
- indicação e quantificação (em relação à média) dos clientes com maior sensibilidade à interrupção de energia;
- energia média mensal consumida por cada cliente;

c) Dados dos DPMs a ser alocados

- custo do DPM

4.4 BLOCO 2 - CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO – DADOS GERAIS

Este Bloco contém dados gerais de contorno para o processo de alocação de DPMs:

- quantidade máxima de DPMs alocados em cada alimentador em estudo;
- os critérios de otimização e de finalização do processo, por meio da indicação da tolerância entre duas buscas de otimização com alocação de quantidades sucessivas de DPM. A tolerância é expressa por meio de valor de benefício (em valor financeiro ou de indicador de continuidade);
- parâmetros operacionais, expresso pelo tempo médio de atendimento (TMA), para estimativa de graus de mérito que envolvam período de tempo, como END e DEC.

4.5 BLOCO 3 - GERAÇÃO DE ALTERNATIVAS DE ALOCAÇÃO DE DPMS

Com base nos dados do Bloco 1 e nos critérios do Bloco 2, realizam-se efetivamente as propostas de alocação de DPMs para posteriormente no bloco seguinte serem calculados os índices de mérito e de desempenho máximo do alimentador (DMA), de cada alternativa de alocação de DPMs.

4.5.3 Formulação da Metodologia para cálculo do DMA

O universo de alternativas do problema em um alimentador com potencial de “i” posições (postes) que possam abrigar até DPM_T é a somatória das alternativas com 1, 2 até DPM_T alocadas em todas as combinações possíveis. Assim, considerando o digrama da figura 4.3 e a taxa de falha constante para todos os trechos da rede e ainda que:

a_j – Somatório dos clientes nos trechos da região a montante da posição i.

L_k – Somatório da quantidade de falhas nos trechos da região a jusante da posição i.

Figura 4.3 – Diagrama de posições

Nota: Devido a simplicidade da metodologia, foi considerado que cada posição “i” seja cada poste físico do alimentador, não havendo assim a necessidade de otimização ou agrupamentos de trechos com densidade de clientes nulos.

O universo de alternativas para a alocação de até DPM_T proteções pode ser reduzido pelos passos do processo de indução:

- Quantidade de alternativas para a alocação da primeira proteção em um alimentador de n potenciais posições de alocação (postes):

$$P_i = \sum_{j=1}^i a_j \cdot \sum_{k=i}^n L_k \quad (4.1)$$

- O valor máximo de P_i , $i=1,n$, é o valor de $IMax(1)$, correspondente a posição I_1 do DPM alocado, onde a figura 4.4 exemplifica esta posição. O valor do $dma = IMax(1)$ para 1 (uma) proteção.

Figura 4.4 – Exemplo da posição I_1 do $IMax(1)$

- Quantidade de alternativas para a alocação da segunda proteção em um alimentador de n potenciais posições de alocação (postes):

- ✓ quando a potencial proteção P_i estiver na região a montante do DPM da posição I_1 :

$$P_i = \sum_{j=1}^i a_j \cdot \sum_{k=i}^{I_1} L_k \quad (4.2)$$

- ✓ quando a potencial proteção P_i estiver na região a jusante do DPM da posição I_1 :

$$P_i = \sum_{j=I_1}^i a_j \cdot \sum_{k=i}^n L_k \quad (4.3)$$

- O valor máximo de P_i , $i=1, I_1$ e $i=I_1, n$, é o valor de $IMax(2)$, correspondente a posição I_2 , onde a figura 4.5 exemplifica esta posição. O valor do $dma = IMax(1) + IMax(2)$ para 2 (duas) proteções.

Figura 4.5 – Exemplo da posição I_2 do $IMax(2)$

- Quantidade de alternativas para a alocação de três até DPM_T proteção em um alimentador de n potenciais posições de alocação (postes):

- ✓ quando a potencial proteção P_i estiver na região a jusante do DPM da subestação, a posição $I_{(ij)}$ corresponde as posições a jusante da região.

$$P_i = \sum_{j=1}^i a_j \cdot \sum_{k=i}^{I_{(ij)}} L_k \quad (4.4)$$

- ✓ quando a potencial proteção P_i estiver entre dois ou mais DPMs, a posição $I_{(im)}$ corresponde as posições a montante da região de P_i e a posição $I_{(ij)}$ corresponde as posições a jusante de P_i .

$$P_i = \sum_{j=I(im)}^i a_j \cdot \sum_{k=i}^{I(ij)} L_k \quad (4.5)$$

- ✓ quando a potencial proteção P_i tiver apenas DPMs a montante, a posição $I(im)$ corresponde as posições a montante da região.

$$P_i = \sum_{j=I(im)}^i a_j \cdot \sum_{k=i}^n L_k \quad (4.6)$$

- O valor máximo de P_i , $i=1, I_{ij}$, $i=I_{im}$, I_{ij} , e $i=I_{im}, n$, é o valor de $IMax(i)$, onde $i=1, n$. O valor do $dma = \sum_{i=1}^n IMax(i)$ para alocação de DPM_T .
- Quantidade de alternativas simuladas (QAS) para o “n” posições quem possam a abrigar até DPM_T em um alimentador é determinada pela somatória de uma progressão aritmética (P.A) decrescente:

$$QAS = DPM_T \cdot \frac{(2 \cdot n - DPM_T + 1)}{2} \quad (4.7)$$

Onde,

n : é a quantidade de posições (postes) do alimentador;

DPM_T : quantidade pré-estabelecida de DPMs;

4.6 BLOCO 4 - ANÁLISE E SELEÇÃO DE ALTERNATIVAS DE ALOCAÇÃO DE DPMS

Os parâmetros que explicam o desempenho de cada passo de alocação de cada DPM podem ser classificados conforme se situem “além” ou “aquém” do local de instalação, considerando como sentido do alimentador, como sendo da subestação para o final; e como abrangência, a porção do alimentador compreendida entre os DPMs imediatamente a montante e a jusante desse local.

A avaliação de cada ponto de alocação de DPM é realizada por meio do Índice de Mérito associado, que é calculado pelo produto de duas variáveis em relação à barra em análise: uma variável a montante (“Aquém”) e outra a jusante (“Além”).

As variáveis a montante (“Aquém”) podem ser as seguintes grandezas que estejam no trecho do alimentador compreendido entre o ponto em análise e o DPM imediatamente a sua montante:

- “Cliente” – quantidade de clientes.
- “Carga” - potência instalada ou energia média mensal.
- “Clientes Especiais” – quantidade de clientes com sensibilidade à interrupção.
- “Trechos Especiais” – conjunto de trechos com clientes de alta sensibilidade à interrupção, como por ex.: trechos com hospitais, condomínios industriais etc.

A variável a jusante (“Além”) é a expectativa de quantidade de falhas a ocorrer, por unidade de tempo (em geral, ano) no trecho de alimentador compreendido entre o ponto de locação em análise e o DPM imediatamente a jusante. A variável “além” pode ser expressa pelo produto de valor médio de taxa de falha e comprimento do trecho do alimentador, ou pela composição de valores estatísticos de ocorrência de falhas em determinados trechos e correspondentes comprimentos.

Por sua vez, uma Alternativa de alocação de uma certa quantidade de DPMs é a somatória dos Índices de Mérito associados a cada um dos DPMs alocados, denominada de DMA – Desempenho Máximo do Alimentador.

Assim, no cálculo do DMA de um alimentador, podem ser considerados vários critérios, conforme se compute e privilegie em diferentes níveis as variáveis “aquém” e “além”, inclusive ponderando-as e compondo-as, resultando em desempenhos de alimentadores para otimizar - “Cliente” quantidade de clientes interrompidos, “Carga” - potência instalada ou energia média mensal interrompida, - “Clientes Especiais” – quantidade de clientes com sensibilidade à interrupção afetados, considerando taxas médias de falha ou mesmo quantidades de falhas concentradas em “Trechos Especiais”. A formulação para o cálculo do DMA é :

$IMax(i) \rightarrow$

$$\{ \text{Maximização } IM(i) = \sum_{j=1}^i Cx_{(j)} \cdot zx_{(j)} \cdot \sum_{k=i}^n Cy_{(k)} \cdot zy_{(k)} \text{ para } (i = 1, n) \}. \quad (4.8)$$

Tendo,

$$dma = \sum_{i=1}^{DPM_T} IMax_{(i)} \quad (4.9)$$

Para efeito de normalização, define-se a variável *DMA*

$$DMA = \frac{dma(\sum_{i=1}^{DPM_T} IMax_{(i)})}{FI} \quad (4.10)$$

Onde,

dma é o desempenho máximo do alimentador

DMA é o desempenho máximo do alimentador em valor normalizado

Cx(j) *i*= 1,*n* : Variáveis localizadas a montante, afetadas por interrupções a jusante

Cy(k): Quantidade média de falhas a jusante, num período de tempo.

zx (j) : Ponderações aplicada a *Cx (j)* para expressar sensibilidades superiores a média de clientes a montante;

zy (k) : : Ponderações aplicadas a *Cy (k)* para expressar taxas de falha superiores a média em trechos de alimentador a montante

FI: Fator inicial de risco.

4.7 BLOCO 5 - RESULTADOS

4.7.1 Ramificação do DMA

a) DMA Ideal é o módulo de resultado da alocação otimizada dos DPMs do alimentador, considerando apenas o disjuntor como dispositivo de proteção. Este módulo é subdividido em DMA Consumidor, Carga e Híbrido, onde:

a1 –DMA Consumidor possui as variáveis a montante focado em clientes;

a2 –DMA Carga possui as variáveis a montante focado na carga (kWh médio);

a3 –DMA Híbrido possui as variáveis a montante pela associação dos clientes pela carga.

- b) DMA Real é o módulo de resultado da simulação do valor de DMA dos DPMs instalados no alimentador em sua configuração original, onde $DMA_{real} < DMA_{Ideal}$.
- c) DMA Projeto é o módulo de resultado da adequação da alocação otimizada dos DPMs do alimentador para a posição mais favorável ou na situação mais econômica, ou seja, muitas das alocações otimizadas podem estar próximas a DPM já instalados, no qual é viável manter os dispositivos existentes ou as alocações otimizadas estarem em lugares de difícil acesso, como viadutos. Para esta situação é necessária a realocação do DPM otimizado para outra posição favorável.

4.7.2 Critério de Finalização

Ao se alocar, sequencialmente ou aleatoriamente, DPM em um alimentador, segundo o critério de otimização DMA, observa-se que o benefício de desempenho, em face da continuidade, obtido pelas primeiras alocações é, via de regra, maior que os sucessivos. À medida que o processo se desenvolve, os benefícios se tornam progressivamente menores, constituindo uma curva Desempenho x Quantidade de DPM com tendência de saturação, como mostrado na Figura 4.6.

Figura 4.6 – Curva assintótica para o Desempenho máximo do Alimentador

A normalização do DMA, faz com que a saturação tenda para a unidade.

Esse comportamento de tendência à saturação recomenda que a interrupção do processo de alocação de DPM seja regida por três fatores, não excludentes:

- o limite de índice de qualidade de interrupção desejado tenha sido atendido;
- o balanço entre o incremento de benefício versus o custo do próximo DPM e
- o limite de coordenação da proteção de DPMs em série.

O primeiro fator pode ser arbitrado em função da simulação dos valores de índice de interrupção, caso o valor perseguido tenha sido atendido, como por exemplo: o FEC - índice de frequência de interrupção ou a taxa de interrupção de determinadas cargas especiais ou ainda certo nível de carga (em potência ou energia) interrompida.

O segundo fator é determinado pelo custo incremental representado pelo investimento e mão de obra de instalação de cada DPM, ou relocação se for o caso, versus o benefício que traz.

Finalmente, o terceiro fator é a limitação de coordenação da proteção de DPMs em série, determinada pelas curvas Tempo x Corrente desses dispositivos e margens de tolerância, que a norma da boa engenharia recomenda. Este fator é função do tipo de DPM utilizado, níveis de curto circuito dos locais e dos ajustes disponíveis nos equipamentos.

4.7.3 Cálculo de Desempenho

O benefício em diminuir o impacto de interrupções em um alimentador é quantificado considerando o cálculo de desempenho – DMA em três situações:

- situação ideal, que representa a alocação de DPM sobre o alimentador com apenas o disjuntor da subestação;
- situação real, que é o cálculo do DMA considerando os DPMs que já se encontram instalados no alimentador e

- situação de projeto, que é o desempenho do alimentador depois de se realizar o projeto de melhoramento do impacto de interrupção nos clientes atendidos. Os critérios de elaboração do projeto são concebidos para aproximar a situação real da ideal, respeitando critérios de bom senso, com por exemplo: a relocação de um DPM, se necessária, deve ser, via de regra, para distâncias superiores a 100 metros .

A figura a seguir ilustra o desempenho em função da quantidade de DPMs para as três situações citadas, observando-se que a situação ideal é a que apresenta o melhor desempenho, seguida da situação de projeto e finalmente a real.

Figura 4.7 – Curva DMA Ideal, Projeto e Real

4.7.4 Priorização dos alimentadores

Uma vez realizados os cálculos de desempenho - DMA para essas situações, para todos os alimentadores em estudo, são avaliadas e priorizadas as obras de instalação considerando fatores individuais ou em associação ponderada como:

- Custos associados para a adequação;
- Redução do FEC em valor absoluto ou percentual;
- Redução do clientes interrompidos em valor absoluto ou percentual;
- Ganho (delta) entre o DMA Ideal e DMA Real;
- Ganho de END entre a configuração do DMA Ideal e DMA Real;

Um elemento de interesse para contribuir na priorização dos investimentos em instalação de DPM é a distribuição de Clientes ao longo do alimentador. Quanto maior for a concentração de clientes nas proximidades da subestação, mais relevante será a contribuição de DPMs na diminuição de impacto da interrupção nos clientes.

Com efeito, em alimentadores longos com grande concentração de clientes em seus trechos finais, observa-se que os clientes estão sujeitos à significativa quantidade de falhas que podem ocorrer no longo trecho inicial, portanto a instalação de DPM se torna pouco efetiva.

As figuras a seguir ilustram esse fato:

Figura 4.8 – Exemplo do índice DMA Ideal para três alimentadores

Curva Alta: A figura 4.9 representa a distribuição topográfica curta ou longa com a aglomeração de clientes/cargas próxima à fonte.

Figura 4.9 – Curva Alta.

Curva Média: A figura 4.10 representa a distribuição topográfica curta ou longa com a uniformidade de clientes/cargas ao longo do alimentador.

Figura 4.10 – Curva Média.

Curva Baixa: A figura 4.11 representa a distribuição topográfica curta ou longa com a aglomeração de clientes/cargas distante da fonte.

Figura 4.11 – Curva Baixa.

A seguir são apresentados diagramas de fluxo do processo de avaliação dos alimentadores e priorização de obras.

Figura 4.12 – Fluxograma do “Módulo de Avaliação dos Alimentadores”

A Figura 4.13 a seguir representa o fluxograma da estrutura da metodologia de alocação apresentada DMA.

Figura 4.13 – Fluxograma das etapas do processo da metodologia

5. APLICAÇÃO DA SOLUÇÃO

5.1 FERRAMENTA COMPUTACIONAL DE OTIMIZAÇÃO

Esta etapa tem como objetivo apresentar, de forma resumida, as principais funcionalidades do software de otimização dos pontos para alocação dos dispositivos de proteção e manobras. Desenvolvida no âmbito desta pesquisa e do programa de P&D da Companhia Paulista de Força e Luz, e parceira com a empresa de Consultoria Daimon Engenharia e Sistemas. A ferramenta foi desenvolvida para o ambiente Windows na linguagem c++.

5.1.1 Ferramenta DMA

A proposta é apresentar as principais funções da ferramenta DMA. A ferramenta foi estruturada de forma a atender a metodologia e todos os critérios desta pesquisa. A ferramenta aplica todos os conceitos da pesquisa na simulação em alimentadores das Distribuidoras de Energia com tempo computacional razoável. A análise dos alimentadores do estudo, em média foi realizada em um tempo computacional de 30 segundos para cada alimentador.

A seguir serão destacadas os principais acesso na tela principal da *Ferramenta DMA*, onde é dividida em camadas, conforme apresentado na Figura 5.1 a seguir.

Figura 5.1 – Divisão da Tela Principal da Ferramenta DMA

Divisão das Camadas:

- A) Na barra de ferramenta principal e do banco de dados aciona as funções do sistema para a configuração, importação e exportação da base de dados da rede elétrica e relatórios da metodologia DMA.
- B) Na barra de ferramenta da rede aciona a rotina de montagem da configuração geográfica do alimentador com seus componentes, a saber: rede elétrica, dispositivos de proteção e manobra, chaves, clientes, trechos etc. Esta barra também aciona as configuração de formas e cores dos elementos da tela.
- C) Na barra de ferramenta do DMA aciona as funções para a execução da metodologia DMA e todos os critérios apontando nesta pesquisa, dentre os quais: cálculos do DMA Ideal, Real, Projetos, curvas etc.

Principais funções das camadas:

- a) Para a barra de ferramenta principal e do banco de dados temos:
 - Função de importação de base de dados em arquivos com especificações pré-determinadas, por exemplo, no formato texto (.txt). A figura 5, apresenta a janela de importação de dados, onde o usuário deverá selecionar a pasta com os arquivos de importação.

Figura 5.2 - Seleção do Tipo de Arquivo de Importação

- Base de custos dos tipos de DPMs e chaves que são utilizadas e atualizadas na ferramenta por meio de função específica, conforme figura 5.3. Os custos apresentados nos relatórios de projetos são baseados em parâmetros pré-ajustados. Pode-se observar na Figura 5.3, a tabela de custos de material e de mão-de-obra referente as DPMs e chaves.

Função	Proteção	Nível de tensão [kV]	Custo do material [R\$]	Custo mão de obra [R\$]
Instalação	Seccionalizadora	15	803,57	117,91
Realocação	Seccionalizadora	15	320,76	140,09
Exclusão	Seccionalizadora	15	0	112,34
Instalação	Chave Fusível	15	779,69	117,91
Realocação	Chave Fusível	15	320,76	140,09
Exclusão	Chave Fusível	15	0	112,34
Instalação	Religadora	15	24094,8	322,07
Realocação	Religadora	15	570,25	379,16
Exclusão	Religadora	15	0	241,08
Instalação	Seccionalizadora	23	1484,46	117,91
Realocação	Seccionalizadora	23	396,9	140,09
Exclusão	Seccionalizadora	23	0	112,34
Instalação	Chave Fusível	23	878,13	117,91
Realocação	Chave Fusível	23	646,9	140,09
Exclusão	Chave Fusível	23	0	112,34
Instalação	Religadora	23	25293,42	322,07
Realocação	Religadora	23	646,39	379,16
Exclusão	Religadora	23	0	241,08

Figura 5.3 – Tabela de Parametrização de Custos das Chaves

- A apresentação de gráficos da metodologia de cálculo DMA (Consumidor, Carga e Híbrido) dos alimentadores, conforme figura 5.4.

Figura 5.4 – Gráfico da metodologia DMA

- A apresentação de resultados comparativos entre alimentadores da metodologia de cálculo DMA, na forma de gráfico de barras, conforme figura 5.5.

Figura 5.5 – Gráfico Comparativo entre Alimentadores

- Funções de relatórios de resultados e análises realizadas dentro da ferramenta DMA, para visualização e exportação de dados, conforme exemplificação da figura 5.6.

Subestação: JUN

Circuito: JUN02

DMA

Real: 0,482

Ideal: 0,569

Projetado: 0,578

Sem ocorrências neste período

Custo: R\$ 224,68

FEC antes: 0,000 interrupções/período

FEC depois: 0,000 interrupções/período

CI antes: 0

CI depois: 0

Tabela de Chaves

	Real	Projetado
Disjuntor	1	1
Religador	1	1
Chave Fusível	4	2

Projeto

Descrição: Exemplo do Relatório de Software

Data inicial: 10/02/2013

Modelo: Dma Consumidor

Data final: 12/03/2013

Obras

Nº:	Código:	Tipo	Custo	Coordenadas da barra 1	
				X	Y
1	25	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00	3072565	74337658
2	443676	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00	3068682	74345215
3	340273	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00	3071209	74341260
4	293909-P1	Proteção ainda não definida.	R\$ 0,00	3069054	74344602
5	293148-P1	Proteção ainda não definida.	R\$ 0,00	3066680	74346387
6	340272	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00	3071828	74339319

Figura 5.6 – Relatório de Projeto

b) Na barra de ferramenta da rede temos:

- Desenha o traçados dos alimentadores de forma georreferenciada e apresenta as características técnicas as informações do sistema conforme figura 5.7 e descrição abaixo:
 - i) Circuito: resumo sobre as condições de tensão, carregamento, total de consumidores, potência aparente total, etc.
 - ii) Cargas: resumo de quantidade de estações transformadoras particulares e comunitárias com medição e quantidade de cargas por classe de faturamento (Média tensão ou Baixa tensão).
 - iii) Chaves: resumo dos tipos e quantidades de chaves e proteções da rede selecionada.
 - iv) Trechos: resumo do comprimento total da rede MT e BT.
 - v) Transformadores: transformadores de linha, quantidade e tensão.
 - vi) Capacitores: quantidade e tensão bancos de capacitores.
 - vii) Reguladores de tensão: quantidade e tensão dos reguladores.

Figura 5.7 – a) Diagnóstico Técnico Geral do Circuito; b) Quantidade de Cargas por Tipo (ET e EP); c) Quantidade de Chaves por Tipo; d) Comprimento Total da Rede MT e BT; e) Quantidade de Reguladores de Tensão e Descrição; f) Quantidade de Banco de Capacitores e Descrição; g) Quantidade de Trafos de Linha e Descrição

- Visualização Topográfica exibe dos elementos gráficos que permite a personalização, edição dos DPMs e chaves do sistema, conforme figura 5.8.

Figura 5.8 – a) Janela de Edição dos Equipamentos de Rede; b) Edição do Fundo de Tela

- Nesta janela além de permitir os ajustes nas formas e cores de visualização dos objetos da tela, é possível também analisar diversos alimentadores e verificar as possibilidades de manobras com as chaves de vis-à-vis, que permanecem abertas (NA).

c) Na barra de ferramenta do DMA temos:

- O módulo de Desempenho Máximo do Alimentador permite ao usuário a realização dos cálculos e aplicação dos critérios demonstrados na pesquisa.
- A função seleção dos trechos ponderados é uma ferramenta para simular eventualidades de uma alta taxa de ocorrências (agentes exógenos), ou para considerar um grupo de

clientes como especial para o sistema, como por exemplo zona industrial, conforme figura 5.9.

id Trecho	Trecho	Circuito	Risco	Probabilidade	X	Y
12536	292611-P1	JUN02	50,00	50,00	3064646	74349410
12537	292561-P1	JUN02	50,00	100,00	3064547	74349550
12460	292999-P1	JUN02	200,00	50,00	3066143	74348820
12461	292998-P1	JUN02	100,00	100,00	3066143	74348820
12579	292984-InkP2	JUN02	0	100,00	3066075	74348782

Figura 5.9 – Janela de Seleção dos Trechos Ponderados

A seleção de trechos com características específicas (trechos arborizados, clientes importantes etc) pondera a análise de um alimentador, propiciando resultados com maior aderência com a realidade do sistema.

Cria-se assim uma diferenciação entre os trechos selecionados e os demais, de forma que o peso, seja ele para os fatores de riscos de clientes afetados (Peso Risco) ou de taxa de defeito (Peso Probabilidade), tenha um incremento em seu valor absoluto inicial. Como exemplo, cita-se um trecho “X” com 50 clientes especiais e 100 metros, na qual seriam estes os valores iniciais para o cálculo do índice de mérito, com a seleção de trechos ponderados em 100% para os Peso Risco e Peso Probabilidade. Na simulação da alocação de um dispositivo a jusante do trecho “X”, que considera os fatores de riscos, entraria no cálculo do índice de mérito o valor de 50. Com a seleção de trechos, o valor passa a ser de 100, criando assim um incremento do índice de mérito para os trechos que contemplem o trecho “X”.

Para os casos de simulação a montante do trecho “X”, que considera os fatores de taxa de defeito, entraria no cálculo do índice de mérito o valor de 100. Com a seleção de trechos, o valor passa a ser de 200, criando assim um incremento do índice de mérito para os trechos que contemplem o trecho “X”.

- A função “Cálculo” tem como funcionalidade definir os parâmetros que norteará o processo de otimização de interrupção como: quantidade de clientes, somatória de carga, quantidade máxima de DPMs a serem utilizadas etc. A figura 5.10 mostra a aba de seleção de cálculo:

Figura 5.10 – Aba de Cálculo do DMA

- Após a execução do Cálculo do DMA, esta função “Resultados” apresenta os detalhes para cada alimentador, visualizando-se a variação entre o DMA Ideal (Consumidor, Carga e Híbrido) e DMA Real e a contribuição de cada proteção para o valor final do DMA, conforme figura 5.11.

Alimentador	Nº de Chaves	Dma Real Consumidor	Dma Ideal Consumidor	Delta Dma Consumidor	Dma Real Carga	Dma Ideal Carga	Delta Dma Carga	Dma Real Híbrido	Dma Ideal Híbrido	Delta Dma Híbrido
* JUN02	6	0,482	0,569	0,087	0,406	0,548	0,142	0,444	0,538	0,094

Nº Proteção	Código da ligação: Consumidor	Contribuição DMA Consumidor	Código da ligação: Carga	Contribuição DMA Carga	Código da ligação: Híbrido	Contribuição DMA Híbrido
1	233609-H-P1	0,322	233208-P1	0,247	233609-H-P1	0,268
2	234509-P1	0,068	233452-P1	0,115	233148-P1	0,086
3	233909-P1	0,067	234509-P1	0,069	234509-P1	0,068
4	233148-P1	0,065	233909-P1	0,068	233909-P1	0,067
5	235123-P1	0,047	235123-P1	0,050	23452-P1	0,049

Figura 5.11 – Aba de Resultados do Cálculo de DMA

- A função “Projetos” permite o ajuste da proposta do DMA Ideal para uma proposta real, que considera as restrições físicas e as posições dos DPMs existentes. Os projetos serão individuais e por tipo (consumidor, carga e híbrido), conforme figura 5.12a e 5.12b.

Figura 5.12a – Carregamento ou Criação de um Projeto

Figura 5.12b – Aba de Projeto com um Projeto em Fase de Edição

5.2 ESTUDO DE CASO

O objetivo desta etapa é apresentar o estudo de aplicação piloto para a consolidação da metodologia DMA. As recomendações de caráter técnico, de instalação ou remoção de dispositivos de proteção, deverão ser capazes de apontar os benefícios previstos, tal como a melhora no indicador FEC dos alimentadores em análise. Assim sendo, estão apresentadas as providências necessárias, incluindo os custos relacionados, para a melhoria do indicador FEC de alimentadores da subestação Várzea Paulista, localizada na região sudeste da cidade de Várzea Paulista – SP, escolhida para a aplicação do piloto.

5.2.1 SE Várzea Paulista

Foram realizados os cálculos dos valores de DMA de todos os alimentadores da Subestação Várzea Paulista –VPL, e verificados quais apresentam a melhor perspectiva de intervenção para se otimizar o indicador de continuidade FEC, conforme item 4.7.

A tela da Ferramenta DMA com todos os alimentadores da SE VPL é mostrada na figura 5.13.

Figura 5.13 – Alimentadores da SE VPL

5.2.2 Dados Adicionais da Aplicação Piloto

Como critério de finalização do processo manteve-se a quantidade atual de dispositivos de proteção como quantidade limitante para cálculo, independentemente da qualidade de interrupção, conforme descrito no item 4.7.2.

Para a simulação piloto, foram incorporados os dados de ocorrência da rede primária dos alimentadores em análise (desligamentos não-programados) e seleção de clientes especiais e/ou de trechos. Observe-se que a *Ferramenta DMA* permite realizar uma ponderação diferenciada das variáveis, tanto a jusante (além), quanto a montante (aquém) da barra em estudo, conforme as situações abaixo:

- a) A diferenciação é fornecida pelas ocorrências que, devido à interferência com a arborização em determinados trechos dos alimentadores, por exemplo, acentuam a necessidade da instalação de um dispositivo de proteção. As ocorrências darão um peso maior a determinados trechos, além da questão do comprimento da rede primária nua.

- b) A diferenciação é fornecida pela presença de unidades consumidoras consideradas mais sensíveis pela concessionária em determinadas barras dos alimentadores, que também ressaltam a necessidade da instalação de dispositivos de proteção logo após essas barras, reduzindo sua exposição ao risco de desligamentos. Assim, a presença de clientes especiais dá peso maior a determinadas barras, além da quantificação de unidades consumidoras conectadas.

5.2.3 Resultados

Os resultados do cálculo do DMA, tanto “DMA Ideal” como “DMA Real”, são apresentados a seguir, conforme as Figuras 5.14, 5.15 e 5.16:

a) DMA Consumidor

Figura 5.14 – Resultado da Hierarquização do DMA pela Diferença entre o Valor Ideal e o Valor Real dos Alimentadores da SE VPL, pelo Critério DMA Consumidor

b) DMA Carga

Figura 5.15 – Resultado da Hierarquização do DMA pela Diferença entre o Valor Ideal e o Valor Real dos Alimentadores da SE VPL, pelo Critério DMA Carga

c) DMA Híbrido

Figura 5.16 – Resultado da Hierarquização do DMA pela Diferença entre o Valor Ideal e o Valor Real dos Alimentadores da SE VPL, pelo Critério DMA Híbrido

5.2.4 Escolha do Piloto

Após o cálculo de DMA para a seleção dos alimentadores, é necessária a execução do módulo de avaliação dos alimentadores, conforme item 4.7.3 e 4.7.4. Nesta etapa realizam-se a priorização e o ranqueamento dos alimentadores, conforme tabela 5.1. Lembrando que

a escolha da priorização do estudo de caso foi pela diferença absoluta entre o DMA Ideal e Real, conforme descrito no item 5.2.1.

Circuito	Curva	Ranqueamento pelo Delta entre DMA Ideal e Real	DMA		
			Real	Ideal	Delta (Ganho)
VPL-01	Curva Alta	1º	0,42	0,825	0,405
VPL-02		2º	0,505	0,813	0,308
VPL-03		3º	0,606	0,792	0,186
VPL-04		4º	0,583	0,755	0,172
VPL-05		8º	0,772	0,875	0,103
VPL-06		12º	0,766	0,825	0,059
VPL-07		7º	0,712	0,816	0,104
VPL-12	Curva Média	6º	0,769	0,886	0,117
VPL-09		10º	0,538	0,603	0,065
VPL-10		5º	0,402	0,553	0,151
VPL-11	Curva Baixa	11º	0,601	0,662	0,061
VPL-08		9º	0,12	0,213	0,093

Tabela 5.1 – Avaliação dos alimentadores

Apenas como exemplo, após a análise entre os alimentadores da subestação Várzea Paulista, foi selecionado para a implantação piloto o alimentador VPL-01 por representar a maior diferença entre o DMA Ideal e Real. Por estar em uma área que atende em sua maioria a clientes residenciais, o índice mais representativo ao alimentador em análise é o DMA Consumidor. A Figura 5.17, apresenta o alimentador escolhido VPL-01.

Figura 5.17– Alimentador VPL-01 que Será Abordado para Projeto

A seleção do alimentador, conforme descrito, foi realizado pela diferença absoluta entre o índice de DMA Ideal e Real, embora outros critérios poderiam ser considerados. Após a seleção do alimentador, é necessária a adequação dos pontos propostos pela metodologia para a realidade em campo. Esta adequação é realizada pela função de Projeto da ferramenta DMA.

Abaixo estão listadas as características básicas do alimentador selecionado:

Alimentador VPL-01 da SE –VPL

Clientes Atendidos: 4.662

Comprimento: 19,87km

Características: Residencial

Quantidades de dispositivos de proteção instaladas: 31

Quantidades de postes (posição “i” potencial): 536

Como a função “Projeto” para obter o DMA Projeto é individualizada, além de escolher o alimentador, seleciona também o tipo de DMA (Consumidor, Carga ou Híbrido) a ser aplicado no projeto. A Figura a seguir apresenta em detalhes o local de seleção destes parâmetros. Neste caso será a opção DMA consumidor, vistas as características de atendimento do alimentador.

Figura 5.18 – Seleção de Parâmetros de Projeto para o Alimentador VPL-01

Após a definição do nome, haverá um processamento realizado de forma automática, que estabelecerá uma relação entre as proteções do DMA Projeto e as proteções da rede real (DMA Real). Esta relação se dará conforme a distância elétrica e a variação relativa do trecho frente ao alimentador.

São necessárias configurações de parâmetros de distâncias e propriedades para a definição e início do projeto, a saber:

Configuração de Distâncias e Propriedades

Desempenho máximo do alimentador(DMA)

Importador | Propriedades

Ocorrência

☐ Selecionar todas as classes

Classe	Descrição	Considerar
201	Ocorrências com desligamento de equipamentos	Sim
217	Desligamento de equipamento serviço rede secundária - ET	Sim
244	Manobras com desligamento	Sim
246	Defeito na Rede de Alta Tensão	Sim
281	Serviço na rede primária sem desligamento	Sim
350	Serviços em ramais/medição, motivados por falha/defeito	Sim
999	Classe não identificada	Sim

Ajustes da ocorrência

Raio de busca em trechos: 5 (metros)

Raio de busca em proteção: 5 (metros)

Peso da Ocorrência: 100 (%)

Causa

☐ Selecionar todas as causas

Causa	Descrição	Peso	Considerar
11	Descarga Atmosférica	1	Sim
20	Vento	1	Sim
150	Queimada ou Incêndio	1	Sim
170	Inundação	1	Sim
171	Erosão	1	Sim

Consumidores VIP

Classificação	Peso
C	5
D	3
K	2

Confirmar Cancelar Padrão

Figura 5.19 – Janela de Configurações do DMA, para Importação de Ocorrências

Desempenho máximo do alimentador(DMA)

Importador Propriedades

Alimentador VPL01

Orçamento Disponível (R\$): 0

Erro relativo para critério de parada: 0,001

Pesos

Peso da Carga (%): 50

Peso do Consumidor (%): 50

Período de verificação

Início da verificação: 10/02/2013

Fim da verificação: 12/03/2013

Projeto

Distancia de busca geral (m): 200

Distancia de busca para chave Religadora (m): 200

Variação máxima de consumidor/carga (%): 30

Confirmar Cancelar Padrão

Figura 5.20 – Janela de Configurações do DMA, para Configuração de Propriedades

A configuração de distâncias e propriedades influencia na quantidade de equipamentos que serão alocados e/ou removidos no alimentador, após o módulo de projeto. A classificação e peso das falhas do sistema elétrico influencia no indicar DMA e consequentemente na posição dos dispositivos.

A proposta deste módulo é realizar a associação automática dos dispositivos (o termo ‘associação’ refere-se à aproximação topográfica entre as proteções existentes no campo, com aquelas DMA Ideal, de acordo com as parametrizações adotadas)

A Figura 5.21 mostra a relação estabelecida pelo algoritmo do DMA Projeto automaticamente.

Ligações do Projeto		Resultados do Projeto:			
Código	Tipo	Nº Proteção	Código da ligação:	Tipo de Proteção	Custo
21	21(Disjuntor)	1	21	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
300597-P1	Instalar proteção	2	300597-P1	Proteção ainda não definida.	R\$ 0,00
307724-P1	Instalar proteção	3	307724-P1	Proteção ainda não definida.	R\$ 0,00
347675	347675(Chave Fusível)	4	347675	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
307418-P1	Instalar proteção	5	307418-P1	Proteção ainda não definida.	R\$ 0,00
347695	347695(Chave Fusível)	6	347695	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
300378-P1	Instalar proteção	7	300378-P1	Proteção ainda não definida.	R\$ 0,00
443696	443696(Religador)	8	443696	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
300556-P1	Instalar proteção	9	300556-P1	Proteção ainda não definida.	R\$ 0,00
347651	347651(Chave Fusível)	10	347651	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
300377-P1	Instalar proteção	11	300377-P1	Proteção ainda não definida.	R\$ 0,00
303146-P1	Instalar proteção	12	303146-P1	Proteção ainda não definida.	R\$ 0,00
340362	340362(Chave Fusível)	13	340362	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
340363	340363(Chave Fusível)	14	340363	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
347662	347662(Chave Fusível)	15	347662	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
301041	301041(Chave Fusível)	16	301041	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
301247	301247(Chave Fusível)	17	301247	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
307207	307207(Chave Fusível)	18	307207	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
300527	300527(Chave Fusível)	19	300527	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
305387	305387(Chave Fusível)	20	305387	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
299189	299189(Chave Fusível)	21	299189	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
302856-P1	Instalar proteção	22	302856-P1	Proteção ainda não definida.	R\$ 0,00
307420	307420(Chave Fusível)	23	307420	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
306263	306263(Chave Fusível)	24	306263	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
304636	304636(Chave Fusível)	25	304636	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
307111-P1	Instalar proteção	26	307111-P1	Proteção ainda não definida.	R\$ 0,00
347692	347692(Chave Fusível)	27	347692	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
307821-InkP2	Instalar proteção	28	307821-InkP2	Proteção ainda não definida.	R\$ 0,00
307713-P1	Instalar proteção	29	307713-P1	Proteção ainda não definida.	R\$ 0,00
347650	347650(Chave Fusível)	30	347650	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
304635-P1	Instalar proteção	31	304635-P1	Proteção ainda não definida.	R\$ 0,00

Figura 5.21 – Relacionamento Estabelecido entre as Proteções do DMA Real e do DMA Projetado

Na parte esquerda da tela da Figura 5.21, observa-se no item “Tipo de Proteção”, que foram associadas 19 (dezenove) proteções do caso real, incluindo-se o disjuntor.

Após executar as associações, podem-se realizar outras associações de proteções que não foram contempladas na lista de proteções do Projeto, de forma automática. Na Figura 5.22, clicando-se em “Instalar proteção”, na coluna “Tipo de Proteção”, ativa-se uma lista com as novas bases-fusíveis a ser instaladas, e uma lista com as bases-fusíveis existentes, passíveis de ser realocadas.

Ligações do Projeto		Resultados do Projeto:			
Código	Tipo	Nº Proteção	Código da ligação:	Tipo de Proteção	Custo
21	21(Disjuntor)	1	21	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
300597-P1	Lista de proteções existente	2	300597-P1	Proteção ainda não definida.	R\$ 0,00
307724-P1	Lista de Proteções novas:	3	307724-P1	Proteção ainda não definida.	R\$ 0,00
347675	Religador	4	347675	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
307418-P1	Chave Fusível	5	307418-P1	Proteção ainda não definida.	R\$ 0,00
299319-P1	Seccionalizadora	6	299319-P1	Proteção ainda não definida.	R\$ 0,00
300378-P1	Lista de proteções existentes	7	300378-P1	Proteção ainda não definida.	R\$ 0,00
301852-P1	347647(Chave Fusível)	8	301852-P1	Proteção ainda não definida.	R\$ 0,00
	347649(Chave Fusível)				
	347639(Chave Fusível)				

Figura 5.22 – Lista de Proteções Novas e de Proteções Existentes

Entretanto, as proteções em destaque na Figura 5.22 poderão ser objeto de realocações.

A realização desta etapa implicar em diminuir dos custos para relocação dos dispositivos no sistema elétrico.

Desta forma, com o foco de manter a quantidade de dispositivos de proteção do sistema (31) (critério de finalização adotado), optou-se pela seguinte solução, considerando as proteções de rede existentes:

- Manter a associação sugerida pelo DMA Projeto, do disjuntor e religador;
- Manter a associação sugerida pelo DMA Projeto das 17 BF's, e;
- Realocar as demais bases-fusíveis (12).

Assim, obtém-se a nova configuração de proteções, apresentada na Figura 5.23. Observe-se que na coluna “Tipo”, das Ligações do Projeto, as proteções que foram automaticamente associadas estão deslocadas para a margem esquerda, enquanto que a lista com a realocação de bases-fusíveis existentes, sugerida de forma manual, está centralizada na coluna.

Ligações do Projeto		Resultados do Projeto:			
Código	Tipo	Nº Proteção	Código da ligação:	Tipo de Proteção	Custo
21	21[Disjuntor]	21	300597-P1	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
300597-P1	347647[Chave Fusível]	2	300597-P1	Proteção ainda não definida.	R\$ 0,00
307724-P1	347649[Chave Fusível]	3	307724-P1	Proteção ainda não definida.	R\$ 0,00
347675	347675[Chave Fusível]	4	347675	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
307418-P1	347639[Chave Fusível]	5	307418-P1	Proteção ainda não definida.	R\$ 0,00
347695	347695[Chave Fusível]	6	347695	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
300378-P1	Instalar proteção	7	300378-P1	Proteção ainda não definida.	R\$ 0,00
443696	443696[Religador]	8	443696	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
300556-P1	347652[Chave Fusível]	9	300556-P1	Proteção ainda não definida.	R\$ 0,00
347651	347651[Chave Fusível]	10	347651	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
300377-P1	347654[Chave Fusível]	11	300377-P1	Proteção ainda não definida.	R\$ 0,00
303146-P1	347646[Chave Fusível]	12	303146-P1	Proteção ainda não definida.	R\$ 0,00
340362	340362[Chave Fusível]	13	340362	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
340363	340363[Chave Fusível]	14	340363	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
347662	347662[Chave Fusível]	15	347662	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
301041	301041[Chave Fusível]	16	301041	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
301247	301247[Chave Fusível]	17	301247	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
307207	307207[Chave Fusível]	18	307207	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
300527	300527[Chave Fusível]	19	300527	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
305387	305387[Chave Fusível]	20	305387	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
299189	299189[Chave Fusível]	21	299189	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
302856-P1	347693[Chave Fusível]	22	302856-P1	Proteção ainda não definida.	R\$ 0,00
307420	307420[Chave Fusível]	23	307420	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
306263	306263[Chave Fusível]	24	306263	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
304636	304636[Chave Fusível]	25	304636	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
307111-P1	347658[Chave Fusível]	26	307111-P1	Proteção ainda não definida.	R\$ 0,00
347692	347692[Chave Fusível]	27	347692	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
307821-InkP2	347659[Chave Fusível]	28	307821-InkP2	Proteção ainda não definida.	R\$ 0,00
307713-P1	347716[Chave Fusível]	29	307713-P1	Proteção ainda não definida.	R\$ 0,00
347650	347650[Chave Fusível]	30	347650	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
304635-P1	347715[Chave Fusível]	31	304635-P1	Proteção ainda não definida.	R\$ 0,00

Figura 5.23 – Configuração de Proteções Sugeridas pelo Projeto VPL-01

Recalcula-se então o valor do DMA Projeto, considerando-se o rol de providências da Figura 5.23. A Figura 5.24 apresenta o resultado deste projeto, que resultou no DMA

Projeto de 0,722, com custo de realocação de 12 bases–fusíveis, correspondente a um total de R\$ 5.530,20.

Projeto		Dma Consumidor		0,722	
Ligações do Projeto		Resultados do Projeto:			
Código	Tipo	Nº Proteção	Código da ligação:	Tipo de Proteção	Custo
21	21(Disjuntor)	1	21	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
300597-P1	347647(Chave Fusível)	2	300597-P1	Realocação por Chave fusível 347647	R\$ 460,85
307724-P1	347649(Chave Fusível)	3	307724-P1	Realocação por Chave fusível 347649	R\$ 460,85
347675	347675(Chave Fusível)	4	347675	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
307418-P1	347639(Chave Fusível)	5	307418-P1	Realocação por Chave fusível 347639	R\$ 460,85
347695	347695(Chave Fusível)	6	347695	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
300378-P1	Instalar proteção	7	300378-P1	Realocação por Chave fusível 347652	R\$ 460,85
443696	443696(Relizador)	8	443696	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
300556-P1	347652(Chave Fusível)	9	300556-P1	Realocação por Chave fusível 347653	R\$ 460,85
347651	347651(Chave Fusível)	10	347651	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
300377-P1	347654(Chave Fusível)	11	300377-P1	Realocação por Chave fusível 347654	R\$ 460,85
303146-P1	347646(Chave Fusível)	12	303146-P1	Realocação por Chave fusível 347646	R\$ 460,85
340362	340362(Chave Fusível)	13	340362	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
340363	340363(Chave Fusível)	14	340363	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
347662	347662(Chave Fusível)	15	347662	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
301041	301041(Chave Fusível)	16	301041	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
301247	301247(Chave Fusível)	17	301247	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
307207	307207(Chave Fusível)	18	307207	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
300527	300527(Chave Fusível)	19	300527	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
305387	305387(Chave Fusível)	20	305387	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
299189	299189(Chave Fusível)	21	299189	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
302856-P1	347693(Chave Fusível)	22	302856-P1	Realocação por Chave fusível 347693	R\$ 460,85
307420	307420(Chave Fusível)	23	307420	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
306263	306263(Chave Fusível)	24	306263	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
304636	304636(Chave Fusível)	25	304636	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
307111-P1	347658(Chave Fusível)	26	307111-P1	Realocação por Chave fusível 347658	R\$ 460,85
347692	347692(Chave Fusível)	27	347692	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
307821-InkP2	347659(Chave Fusível)	28	307821-InkP2	Realocação por Chave fusível 347659	R\$ 460,85
307713-P1	347716(Chave Fusível)	29	307713-P1	Realocação por Chave fusível 347716	R\$ 460,85
347650	347650(Chave Fusível)	30	347650	Equipamento existente na rede	R\$ 0,00
304635-P1	347715(Chave Fusível)	31	304635-P1	Realocação por Chave fusível 347715	R\$ 460,85

Figura 5.24 – Tela de Resultado do PROJETO VPL-01

A Figura 5.25 apresenta um extrato do relatório do PROJETO VPL-01.

Subestação: VPL		
Circuito: VPL01		
DMA		
Real:	0,42	Custo: R\$ 5.330,20
Ideal:	0,825	FEC antes: 6,03 interrupções/periodo
Projetado:	0,722	FEC depois: 5,82 interrupções/periodo
		CI antes: 4662
		CI depois: 4662
Tabela de Chaves		
	Real	Projetado
Disjuntor	1	1
Religador	1	1
Chave Fusível	29	29
Chave Faca	0	0
Seccionalizadora	0	0

Figura 5.25 – Resultado em Forma de Relatório, do PROJETO VPL-01

Assim, com a nova configuração DMA proposta, mediante a simulação das mesmas ocorrências de falha do período de 1 ano, obtém-se a redução no valor do FEC do alimentador VPL-01, de 6,03 para 5,82 interrupções, mostrando-se assim ganho no indicador inicial de continuidade com as alocações da metodologia DMA.

Como exemplo foi citado o ganho com o indicador FEC, porém outros ganhos como a END, o FIC, redução das multas por transgressão do prazo de fornecimento etc, podem ser elencados com a aplicação da metodologia DMA para o alimentador.

6. CONCLUSÃO

Pela metodologia, especificou-se o algoritmo que propõe a distribuição inteligente dos dispositivos de proteção e manobra em um alimentador. Apresentaram-se as fórmulas e métodos que são utilizados para calcular os índices de mérito que servem de base para analisar os ganhos e ranqueamento dos alimentadores.

A metodologia abrange em seu algoritmo, índices de mérito para a avaliação técnico-econômica na alocação dos dispositivos de proteção e manobra, com a representação dos ganhos associados à metodologia, de forma que permitiu a seleção mais adequada dos alimentadores para a manutenção, investimento e alocação.

Embora o algoritmo tenha, em sua concepção, a simplicidade e a praticidade para a solução, possui em sua formulação técnicas de grande relevância no meio acadêmico, como metodologia heurística, baseada na busca em profundidade e escolha pelo método gradiente.

A ferramenta foi capaz de executar os cálculos da metodologia com tempo computacional curto, ou seja, tempo razoável para a análise em massa dos alimentadores de operação de uma distribuidora de energia. Foi demonstrada com a aplicação da alocação dos dispositivos de proteção e manobra nos alimentadores da subestação Várzea Paulista (VPL), conforme estudo de caso.

A ferramenta computacional proporcionou a utilização e aplicação da metodologia DMA para Distribuidora, como critério de grande auxílio para a Área de Planejamento, Proteção e da Qualidade de Energia da concessionária, particularmente em relação às questões de confiabilidade de sistemas elétricos.

Pelos métodos de priorização da metodologia DMA, pode-se direcionar melhor o tipo de intervenção necessária para cada alimentador, de forma a otimizar os recursos financeiros e físicos, tendo assim melhores resultados.

Com relação ao Estudo de Caso, comprovou-se:

- A otimização da continuidade do serviço, com a melhora do indicador técnico de continuidade FEC. Sabendo que utilizou-se como critério de finalização, a mesma quantidade de dispositivos de proteção e manobra do sistema atual.
- Tempo computacional factível com a utilização de inúmeras variáveis tais como consumidores, cargas, ocorrências, clientes especiais, falhas no sistema, arborização, comprimento e critérios de finalização, entre outros, visando a encontrar a solução ótima na alocação dos dispositivos de proteção.
- Ferramenta com interface amigável de fácil uso e manipulação na alocação otimizada dos dispositivos de proteção e manobra. Possui uma visão georreferenciada, compatível com o sistema GIS, e módulos complementares para exportação externa para a análise em outros sistemas.

Entende-se que a metodologia do estudo foca nos indicadores relacionados à frequência de interrupção de clientes ou perdas de cargas, mas acredita-se que este possa ser mais bem explorado através da realização de pesquisas complementares de assuntos que estão diretamente relacionados com a continuidade do serviço de distribuição, dentre eles sugerem-se os seguintes temas:

- Metodologia relacionada a indicadores que levam o tempo em sua formulação (DEC, DIC, DMIC e DICRI);
- Metodologia relacionada a indicadores transitórios para redução de sag e swell;
- Impacto com a alteração da configuração da rede através de manobras de chaves com alimentadores vizinhos (vis-à-vis ou top);
- Novo módulo da ferramenta para definição automática do tipo de dispositivo a ser alocado (Religador, chaves fusíveis etc).

Concluindo, a metodologia DMA foi publicada como pesquisa em alguns seminários e congressos nacionais e internacionais. A publicação teve como nome “Metodologia de Alocação Otimizada de Dispositivos de Proteção em Alimentadores, Baseada no Desempenho Máximo do Alimentador (DMA)”, e foi apresentada de forma presencial nos seguintes congressos e seminários:

- ✓ CBQEE 2011 → Mato Grosso
- ✓ SENDI 2012 → Rio de Janeiro
- ✓ CITINEL 2013 → Rio de Janeiro
- ✓ CLAGTEE 2013 → Chile – Viña Del Mar

7 ANEXOS

7.1 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [OLIVEIRA (2009)] Oliveira, C. C. B.; Kagan, N.; Schmidt, H. P.; Kagan, H.- **Métodos de Otimização Aplicados a Sistemas Elétricos de Potência**, Editora Blucher, 2009.
- [ZAMBON (2006)] Zambon, E.; **Otimização de Índices de Confiabilidade em Redes de Distribuição de Energia Elétrica**, UFES, Dez. 2006.
- [WENYU (2004)] Wenyu, Y.; Jian, L.; Jianmin, Y.; Haipeng, D.; Meng, S.; **Optimal Allocation of Switches in Distribution Networks**, 5th World Congress on Intelligent Control and Automation, Jun. 2004.
- [SCHMIDT (2009)] Schmidt, H. P.: **Planejamento de Sistemas de Distribuição I**", E.P.U.S.P., 2009.
- [ZAMBONI (2002)] Zamboni, G.; **Desenvolvimento e implementação de um Algoritmo de Enumeração Implícita** – Relatório Final de Pesquisa – Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica do CNPQ/PUCRS 2001–2002, PUCRS, Out. 2002.
- [TENG (2003)] Teng, J–H.; Liu, Y–H., "A Novel ACS–Based **Optimum Switch Relocation Method**", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, n° 1, Fev. 2003, pp. 113–120.
- [SEDANO (2006)] Sedano, E. C.; Silva, L. G. W.; Pereira, R. A. F.; Feltrin, A. P.; Mantovani, J. R. S., **Algoritmo de Busca Tabu Reativo Multiobjetivo Dedicado à Restauração de Redes Radiais de Distribuição de Energia Elétrica**, XVI Congresso Brasileiro de Automática, Salvador–BA, Out. 2006.
- [GUERRA (2008)] Guerra, W.; Kagan, N.; **Restauração de Energia em Sistemas de Distribuição Elétrica Utilizando Algoritmos Meméticos**, XVIII SENDI, Olinda – PE, Out. 2008.
- [BILLINTON (1996)] Billinton, R. and Jonnavithula, S. (1996). **Optimal switching device placement in radial distribution systems**, IEEE Transactions on Power Delivery 11(3): 1646–1651.
- [RASI (2010)] ALEXANDRE RASI - CIDEL Argentina 2010 – Paper 05 – **Alocação ótima de chaves para melhoria dos indicadores de continuidade de sistemas de distribuição de energia elétrica por COPEL; LACTEC; UFPR**. Disponível em:

<http://www.labplan.ufsc.br/congressos/Cidel%202010/PDF/SESSION_5/5.3.6.pdf>

Acesso em: Agosto/2014.

[ALYSSON (2010)] Alysson M. Costa - **Alocação de chaves para melhoria da confiabilidade da rede de distribuição de energia elétrica** por UFRGS; UNIPAMPA/UFSM. Disponível em: <http://www.inf.ufrgs.br/~buriol/papers/Costa_SOBRAPO07.pdf>. Acesso em: Agosto/2014.

[DAVID (2009)] David Elmakis - **Genetic algorithm for optimal sectionalizing in radial distribution systems with alternative supply**. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=517529&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D517529>. Acesso em: Agosto/2014.

[Dezaki (2010)] H. Hashemi. Dezaki – **Optimized protective devices allocation in electric power distribution systems based on the current conditions of the devices**. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=5697648&queryText%3DOptimized+Protective+Devices+Allocation+in+Electric+Power++Distribution+Systems+Based+on+the+Current+Conditions+of+the+Devices>>. Acesso em Agosto/2014.

[ORLANDO (2010)] Mário Orlando Oliveira – **CIDEL 2010 - Seleção e Alocação Otimizada de Dispositivos de Proteção e Manobras em Sistemas Elétricos de Distribuição Utilizando o Algoritmo Colônia de Formigas**. Disponível em: <<http://www.cidel2010.com/papers/PAPER-279-13032010.PDF>> Acesso em: Agosto/2014.

[ARTURO (2010)] Arturo S. Bretas - CBA 2010 – **Seleção e Alocação Otimizada de Dispositivos de Proteção Contra Sobrecorrentes em sistemas Elétricos de Distribuição**. Disponível em: <http://www.eletrica.ufpr.br/anais/cba/2010/Artigos/66316_1.pdf> Acesso em: Agosto/2014.

[LAURA (2013)] Laura Silva de Assis - SPBO 2013 - **Abordagem Multiobjetivo para Alocação de Chaves em um Sistema de Distribuição de Energia Elétrica**. Disponível em: <<http://www.din.uem.br/sbpo/sbpo2013/pdf/arq0323.pdf>>. Acesso em: Agosto/2014.

[PRODIST (2014)] Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - Modulo 8. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo8_Revisao_5.pdf. Acesso em: Agosto/2014.

[DORNELES (2009)] Gustavo Dorneles Ferreira – **Otimização da Confiabilidade de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. Disponível em: http://cascavel.cpd.ufsm.br/tede/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=2509 Acesso em: Agosto/2014.

[BURIAN (2009)] Reinaldo Burian – **Algoritmos genéticos na alocação de dispositivos de proteção de distribuição de energia elétrica**. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-06052011-165645/pt-br.php>. Acesso em: Agosto/2014.

[CAMPITELLI (2007)] Eduardo Moretti Campitelli - **Análises e estudos para alocação e ajustes de dispositivos de proteção em redes de média tensão de energia elétrica com geração distribuída**. Disponível em: http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaelettrica/pos-graduacao/199-dissertacao_eduardo_moreti_campitelli.pdf. Acesso em: Agosto/2014.

[CPFL (2012)] CPFL Energia - **REDES DE DISTRIBUIÇÃO AÉREAS**, Disponível em: <http://www.cpfl.com.br/atendimento-a-consumidores/orientacoes-tecnicas/padroes-de-entrada/padroesdeentrada/GED-13.pdf>. Acesso em: Agosto/2014.

[ENERSUL (2013)] ENERSUL - **REDES DE DISTRIBUIÇÃO AÉREAS**, Versão R2, 18/03/2013. Disponível em: <http://www.enersul.com.br/dicas/normas-tecnicas>. Acesso em: Agosto/2014.

[CEMIG (2014)] CEMIG - **REDES DE DISTRIBUIÇÃO AÉREAS**, Disponível em: http://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/Clientes/Documents/Normas%20T%C3%A9cnicas/nd3_1_000001p.pdf. Acesso em: Agosto/2014.

[AES (2005)] AES - **REDES DE DISTRIBUIÇÃO AÉREAS**, Disponível em: [https://www.aeseletropaulo.com.br/padroes-e-normas-tecnicas/manuais-normas-tecnicas-e-de-](https://www.aeseletropaulo.com.br/padroes-e-normas-tecnicas/manuais-normas-tecnicas-e-de)

seguranca/Documents/Padr%C3%B5es%20e%20Normas%20T%C3%A9cnicas/PD_4001.pdf>. Acesso em: Agosto/2014.

[EDP (2013)] EDP Energia - **REDES DE DISTRIBUIÇÃO AÉREAS**, Disponível em: <<http://www.edp.com.br/distribuicao/edp-escelsa/informacoes/tecnicas/padrao-e-especificacoes-tecnicas/Paginas/default.aspx>>. Acesso em: Agosto/2014.

7.2 PUBLICAÇÃO EM CONGRESSO INTERNACIONAL - CLAGTEE 2013

Metodologia de Alocação Otimizada de Dispositivos de Proteção em Alimentadores Baseada em Metodologia Heurística

Anderson H. Uyekita, André Meffe, Dário Takahata, Gabriel Rogatto, Marcelo Maia, Vitor Takeda.

Abstract - This paper presents a methodology for optimal allocation of protection devices along the feeder, so that, in case of a fault, entails the least impact to consumers. Thus it is used a mathematical algorithm that considers several variables located upstream, downstream, and of the bar itself under study, determining the points optimized for installation and allocation of protection elements. It is inferred that, currently, there may be excessive protection elements installed in the network of primary dealers. That diverges from the ideal, perhaps due to the lack of a mathematical methodology which helps the designer to establish the appropriate amount to allocate. Therefore, it is expected that such tool may help to improve the selectivity of the devices, to reduce failure rate with the consequent.

Palavras-chave – Instalação e Alocação otimizada, desempenho otimizado, dispositivos de proteção, índices de confiabilidade.

I. INTRODUÇÃO

Os sistemas de distribuição de energia elétrica vêm a cada dia incorporando novas metodologias para o aumento do desempenho dos sistemas, isto é, diminuir o tempo e a frequência com que os clientes ficam sem energia elétrica. Isto se deve à necessidade do atendimento das metas propostas pelo agente regulador e da satisfação aos clientes.

Um problema visto na alocação de proteções é a determinação da quantidade otimizada de dispositivos necessários para a proteção e a localização destes em um alimentador, visto suas características estruturais, indicadores técnicos, a dependência destes em relação às interferências ambientais, etc. O método propõe determinar a quantidade otimizada e localização destes, com o objetivo de evitar uma alocação desnecessária ou a falta de proteções.

A proposta do trabalho é a de apresentar um algoritmo matemático, que propõe a distribuição inteligente dos dispositivos de proteção (chaves-fusíveis, religadores, seccionadores etc.) ao longo de um alimentador. Para isso, será

empregado um método de busca em profundidade com o método do gradiente para a obtenção das configurações e posteriormente utilizar-se-á um índice de mérito para avaliação/quantificação dos melhores pontos de instalação e suas vantagens.

Normalmente, a metodologia e critérios de alocação de dispositivos de proteção são definidos pela área de Proteção da concessionária (esse órgão tem como objetivo definir critérios/regras para a instalação dos dispositivos de proteção). A nova metodologia tem também como objetivo secundário, avaliar os atuais critérios/regras, através de uma nova alocação de dispositivos de proteção de um alimentador já existente, melhorando onde possível, a robustez do sistema.

II. OBJETIVOS

Este artigo apresenta uma metodologia de alocação otimizada de dispositivos de proteção ao longo do alimentador que, na ocorrência de uma falha, acarrete o menor impacto aos clientes. Utiliza-se assim, um algoritmo matemático que pondera algumas variáveis localizadas à montante, à jusante e da própria barra em estudo, determinando-se os pontos otimizados para alocação dos elementos de proteção. Infere-se que, atualmente, existam excessivos elementos de proteção instalados na rede primária das concessionárias, divergentes da ideal, motivados, talvez, pela falta de uma metodologia matemática que auxilie o projetista a colocá-los na quantidade correta. Espera-se assim que tal ferramenta auxilie na melhora da seletividade dos dispositivos, diminuição da taxa de falhas e a melhora nos indicadores de continuidade dos alimentadores.

III. METODOLOGIA [2]

Essencialmente, esta metodologia contempla o compromisso entre três variáveis: Uma da própria barra (que, na verdade reflete o custo de alocação de um determinado tipo de proteção na mesma), uma à montante, e outra à jusante da barra.

A primeira variável está relacionada com o custo de instalação, realocação ou remoção do dispositivo de proteção da barra em análise.

A segunda variável (à montante) considera o dispositivo de proteção com a funcionalidade de um “protetor” e, sendo assim, quanto mais “variáveis protegidas” houver à montan-

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL.

A. H. Uyekita, A. Meffe, D. Takahata, G. Rogatto e V. Takeda trabalham na Daimon Engenharia e Sistemas (e-mails: anderson.uyekita@daimon.com.br; andre.meffe@daimon.com.br; dario@daimon.com.br; gabriel.rogatto@daimon.com.br; vitor.takeda@daimon.com.br).

M. Maia trabalha na CPFL Paulista (e-mail: mmaia@cpfl.com.br)

te, melhor será o seu desempenho como tal. Esta característica, portanto, faz com que o elemento de proteção seja instalado no final do alimentador.

A terceira variável considera o dispositivo de proteção como um “detector” e, sendo assim, quanto mais “variáveis a serem detectadas” estiverem à jusante, melhor também será seu desempenho. Esta característica, portanto, faz com que o elemento de proteção seja instalado no início do circuito.

Desta forma, pretende-se encontrar um local ótimo para a alocação deste elemento, de forma a atender estas três características de natureza conflitante.

A rede de distribuição de energia elétrica brasileira é predominantemente aérea e radial, e a probabilidade de algum defeito ocorrer é proporcional à extensão dos mesmos. Logo, pode-se utilizar o comprimento das redes como uma variável que expressará a probabilidade do defeito, sendo portanto, um exemplo de variável à jusante a ser “detectada”.

O exemplo mais imediato para a variável à montante (variável a ser protegida) é a quantidade de unidades consumidoras, pois deseja-se que o menor número delas seja atingida pelos defeitos. Alternativamente, pode-se pensar em outras variáveis a serem “protegidas”, como a potência instalada, ou a energia consumida, etc. Evidentemente, pode-se aperfeiçoar a lista de variáveis, tanto à montante, quanto à jusante, contemplando-se outros fatores. Por exemplo, à montante (variáveis a serem protegidas), poder-se-ia considerar consumidores preferenciais, compensações por transgressão aos indicadores de continuidade, etc.

Para a metodologia foram inseridas algumas restrições que deverão atender os critérios de instalações de equipamentos de proteção. Os critérios abaixo são uma pequena listagem das normas e procedimentos técnicos importantes para alocação de proteção:

- Alocação de religadores e seccionadores serão permitidos apenas em troncos urbanos;
- Chaves repetidoras somente serão alocadas em redes rurais;
- O número máximo de chaves fusíveis em série não deverá ultrapassar a quatro, com base na coordenação e seletividade;
- Na zona protegida pela unidade instantânea dos relés dos alimentadores, deve-se evitar o uso de elos fusíveis, pois, com defeitos transitórios, haveria a queima de elo e ainda uma operação automática do disjuntor.

Para auxiliar a explanação do algoritmo, utilizar-se-á a figura 1, que é uma rede fictícia apenas com o disjuntor. Inicialmente, consideram-se como consumidores as variáveis x , y , z e w , e como comprimentos dos trechos, as variáveis a , b , c e d .

Figura 1: Rede simplificada.

Os locais candidatos à alocação de dispositivos de proteção são as barras 1, 2 e 3. A tabela 1 apresenta os resultados das simulações de defeitos nos quatro trechos, apenas com o disjuntor instalado inicialmente.

Tabela 1: Consumidores afetados pelo defeito em cada trecho.

Trecho do defeito	Proteção atuada	Cientes protegidos
a	Disjuntor	0
b	Disjuntor	0
c	Disjuntor	0
d	Disjuntor	0

No caso de contingências em uma rede apenas com o disjuntor instalado, todos os consumidores do alimentador serão afetados e para mitigar a quantidade de consumidores atingidos pelo defeito, instala-se um dispositivo de proteção. A tabela 2 apresenta os casos da instalação desta proteção e o efeito dela na rede ao se simular defeitos nos trechos da rede fictícia. O comprimento de cada trecho será utilizado para ponderar a probabilidade de acontecer o defeito. A função objetivo do algoritmo é a de maximizar a probabilidade de proteção aos clientes, e esse índice será chamado de Desempenho Máximo do Alimentador (DMA).

Tabela 2: Consumidores afetados pelo defeito em cada trecho.

Local Instalação	Trecho do defeito				Clientes protegidos	Probabilidade (DMA)
	a	b	c	d		
1	0	x	x	x	x	$x \cdot (b+c+d)$
2	0	0	(x+y)	(x+y)	(x+y)	$(c+d) \cdot (x+y)$
3	0	0	0	(x+y+z)	(x+y+z)	$d \cdot (x+y+z)$

Para o caso de uma proteção instalada na posição 1, tem-se que o Desempenho Máximo do Alimentador é a soma das parcelas de valores esperados de todos os trechos. Isto é, multiplica-se o comprimento pela quantidade de consumidores protegidos. A figura 2 ilustra o conceito de consumidores à montante e o comprimento à jusante.

Figura 2: Ilustração do cálculo do DMA.

Conforme a figura 2, pode-se simplificar o cálculo do DMA usando-se o conceito de consumidores à montante e comprimento à jusante, a partir do local de instalação da proteção. A equação (1) apresenta o cálculo do DMA.

$$DMA_{clientes} = \underbrace{x \cdot b}_{\text{trecho b}} + \underbrace{x \cdot c}_{\text{trecho c}} + \underbrace{x \cdot d}_{\text{trecho d}} = x \cdot (b + c + d) \quad (1)$$

Adotar-se-á a notação alternativa do $DMA_{clientes}$ conforme (2) para a implementação computacional.

$$DMA_{clientes} = \sum_{k=1}^k \left(\sum_{i=1}^{n_k} C_i \cdot \sum_{n=1}^m L_i \right) \quad [\text{Clientes x Km}] \quad (2)$$

onde,

- n_k : barra com a proteção alocada;
- m : número total de barras;
- C_i : quantidade de clientes no trecho i ;
- L_i : comprimento do trecho i ;
- k : número de proteções instaladas ao longo do alimentador.

Conforme a quantidade de proteções a serem instaladas, e considerando-se que todos os trechos são possíveis candidatos, a quantidade de soluções se torna de natureza fatorial, isto é, a explosão combinatória torna a busca pela solução ótima, uma tarefa proibitiva, forçando a utilização de um algoritmo de otimização.

Portanto, adotou-se o Método de Busca em Profundidade para diminuir o tempo computacional, e assim tornar o problema de alocação de dispositivos de proteção em tempo factível. No Método de Busca em árvore em Profundidade, a cada nível da árvore serão analisadas todas as n possibilidades e posteriormente será escolhida a melhor solução. Após a escolha da melhor opção para um dado nível, este terá $n-1$ filhos que deverão ser analisados analogamente ao pai. A figura 3 exemplifica este procedimento.

Figura 3: Exemplo de busca em profundidade com o método do gradiente (trajetória otimizada em vermelho).

Note-se no exemplo que, a raiz possui seis candidatos, e a escolha da barra 4 se deve ao critério de avaliação. O nível de parada é a quantidade de proteções instaladas ao longo do alimentador (alternativamente poder-se-ia utilizar outro critério de parada, como por exemplo, a diferença do ganho entre uma iteração e outra posterior). Um aspecto positivo dessa metodologia é o tempo computacional reduzido, comparado com as técnicas de busca exaustiva. Um estudo aprofundado de busca em profundidade pode ser encontrado em [1].

De acordo com o método de otimização adotado, o fluxograma da figura 4 expressa de forma sucinta, os passos da ferramenta computacional.

Figura 4: Fluxograma da metodologia adotada.

Pode-se aumentar a quantidade de variáveis em estudo, tanto à montante, quanto à jusante, substituindo-se o comprimento pelas ocorrências ou os consumidores por consumo de energia. A figura 5 apresenta as variações de parâmetros possíveis, assim como a introdução do custo associado à alternativa proposta.

Figura 5: Variáveis passíveis de implementação do DMA.

Desta forma para contemplar a relevância do consumo de energia do consumidor pode-se analogamente ao caso do $DMA_{clientes}$, utilizar a energia consumida ao invés de clientes (alternativamente, a variável a ser analisada poderia ser o potência instalada, ou a Energia Não Distribuída - END). A equação (3) apresenta o $DMA_{energia}$:

$$DMA_{energia} = \sum_{k=1}^k \left(\sum_{i=1}^n P_i \cdot \sum_{n=1}^m L_i \right) \quad (3)$$

onde,

- P_i : potência instalada no trecho i ;

Para solucionar o problema de alocação de dispositivos de proteção, considerando multiobjetivos (minimizar custo de alocação e realocação, maximizar $DMA_{clientes}$, $DMA_{energia}$, $DMA_{ocorrencias}$, clientes (normais ou preferenciais), custos de instalação, etc.), onde cada parâmetro é ponderado por um peso. A equação (4) é um exemplo de uma função multi-objetivo.

$$\text{Maximizar} \left\{ \text{Índice de Mérito} = \frac{x \cdot (1 - \text{Custo}) + y \cdot \text{DMA}_{\text{cliente}} + z \cdot \text{DMA}_{\text{energia}}}{x + y + z} \right\} \quad (4)$$

onde,

x, y e z : são os pesos de cada parâmetro;
 $x+y+z=1$.

Note-se que os valores inseridos na função “Índice de Mérito” devem ser necessariamente normalizados para efeito de análise, caso contrário, haverá comparações entre dados de dimensões/unidades distintas.

Após as várias abordagens do DMA (Clientes, Energia Consumida, etc.) pode-se analisar o comportamento do desempenho (robustez do alimentador) conforme a Figura 6. Este possui uma característica de saturação após a inserção demasiada de proteções, ou seja, deve-se impor um limite da quantidade de dispositivos de proteção, analisando-se a relação Custo/Benefício da alocação de uma nova proteção.

Figura 6: Curvas de Desempenho para dois casos hipotéticos, (nota-se que a curva em vermelho satura em um risco elevado diferentemente da curva em verde, onde o desempenho assume um valor baixo).

O DMA no caso real, representa um ponto, para a quantidade de dispositivos de proteção instalados em campo (no caso exemplo da Figura 6, um circuito com 12 proteções). A diferença entre as curvas “ideal” e “real” deve-se principalmente à distribuição espacial das variáveis analisadas (Energia Consumida, Cliente, etc.) ao longo do circuito. O objeto de análise deste projeto é o de identificar aqueles alimentadores que apresentem diferenças significativas entre o DMA real e o DMA ideal, para uma mesma quantidade de proteções alocadas, podendo-se assim obter ganhos, quer seja pelos investimentos evitados, quer seja pela melhoria na distribuição de recursos de inspeção e manutenção de circuitos.

Ressalte-se, entretanto que, para determinados circuitos, poderá não haver uma melhora na performance, pois existem alimentadores que possuem um desempenho naturalmente inferior. Isso pode ocorrer quando o número de clientes e/ou a potência instalada no final de um circuito é elevado (Por exemplo, um condomínio de alto padrão isolado da cidade). Uma solução para o aumento da performance deste sistema seria o atendimento deste condomínio por um outro alimentador que esteja mais próximo.

Para exemplificar a metodologia, utilizar-se-á a rede fictícia da figura 7. Observe-se que esta rede é ramificada e pos-

sui quatro proteções. Assim sendo, a função do $\text{DMA}_{\text{cliente}}$ será a de determinar uma nova disposição dos dispositivos de proteção.

Figura 7: Rede fictícia utilizada para simulações.

A tabela 3 apresenta a quantidade de consumidores e comprimento presentes em cada bloco, facilitando-se assim os cálculos do DMA.

Tabela 3: Consumidores de cada bloco e comprimento do bloco.

	Consumidores	Comprimento
Bloco 1	23	212
Bloco 2	10	131
Bloco 3	21	184
Bloco 4	17	179
Bloco 5	14	179

Conforme (1), calcula-se o $\text{DMA}_{\text{cliente}}$. A equação (5) a seguir apresenta o cálculo do $\text{DMA}_{\text{cliente}}$ para a rede com quatro proteções.

$$\text{DMA}_{\text{cliente,real}} = \frac{50 \cdot 363}{P_1} + \frac{58 \cdot 310}{P_2} + \frac{10 \cdot 179}{P_3} + \frac{21 \cdot 179}{P_4} = 41.679 \quad (5)$$

Normalizando-se o $\text{DMA}_{\text{cliente,real}}$ pelo comprimento total e consumidores total tem-se (6).

$$\text{DMA}_{\text{cliente,real}} = \frac{41.679}{85 \cdot 885} = 0,554 \quad (6)$$

Para realizar uma comparação igualitária, o $\text{DMA}_{\text{cliente,ideal}}$ deverá também ter apenas quatro proteções instaladas. Utilizando-se a ferramenta computacional DMA, obtém-se os locais otimizados dos dispositivos de proteção, conforme apresentados na figura 8 e na tabela 4, com os locais de instalação de proteção otimizados.

Figura 8: Rede fictícia após a alocação otimizada de proteções.

Tabela 4: Valores de $DMA_{cliente,ideal}$

Local de Instalação	Comprimento à jusante	Consumidores à montante	DMA parcial
Novo P2	371,44524	56	20801,97
P1	364,33964	49	17851,62
P3	179,94932	21	3778,93
Novo P4	140,95734	19	2678,30
$DMA_{cliente,ideal}$			45110,83

Normalizando-se o $DMA_{cliente,ideal}$ pelo comprimento total e consumidores total, tem-se (7).

$$DMA_{cliente,ideal} = 0,60 \quad (7)$$

Assim sendo, o ganho entre as posições ideais e reais dos dispositivos de proteção está apresentado conforme (8):

$$\begin{aligned} \text{Ganho} &= DMA_{cliente,ideal} - DMA_{cliente,real} \\ \text{Ganho} &= 0,60 - 0,554 = 0,046 \end{aligned} \quad (8)$$

Logo, utilizando-se o software DMA pode-se obter um ganho normalizado de 0,046, inferindo-se que com quatro proteções, a diferença (ganho) entre a alocação das proteções ideal e real seja da ordem de 4%.

Similarmente, faz-se uma análise semelhante para todos os alimentadores em estudo, de forma a se ter uma relação de ganhos (diferença entre o DMA ideal e o DMA real), de forma a permitir que o usuário tenha condições de avaliar qual(is) alimentador(es) deverá(ão) ter os dispositivos de proteção instalados ou realocados, de acordo com a sua restrição orçamentária.

IV. RESULTADOS – SOFTWARE IMPLEMENTADO [3]

A. Cálculo do DMA Real e do DMA Ideal

Será apresentado um caso exemplo, com a carga de todos os alimentadores da SE VPL com o intuito de calcular o valor de DMA de todos eles, e verificar qual, ou quais que apresentam a melhor perspectiva de intervenção para se otimizar o indicador de continuidade FEC. Esta sinalização será dada para o(s) alimentador(es) que possui(em) a maior diferença relativa.

Assim, será mostrado o passo-a-passo para o cálculo do DMA dos alimentadores da SE VPL:

a) Selecionar todos os circuitos: Este procedimento está apresentado na figura 9 a seguir.

Figura 9: Tela de Seleção dos Alimentadores da SE VPL.

Assim, a tela da Ferramenta DMA com todos os alimentadores da SE VPL está mostrada na figura 10 a seguir.

Figura 10: Alimentadores da SE VPL.

Após eliminar-se as bases-fusíveis de transformadores, através do ícone (—), processa-se o cálculo do DMA, através do ícone (—), e produz-se a tela da figura 11 a seguir.

Figura 11: Relação de Alimentadores da SE VPL, Respetivos Dispositivos de Proteção e Cálculo de Todos os Tipos de DMA.

Os resultados do cálculo do DMA estão apresentados a seguir, conforme as figuras 12, 13 e 14 a seguir:

a) Delta DMA Consumidor

Figura 12: Resultado da Hierarquização do DMA pela Diferença entre o Valor Ideal e o Valor Real dos Alimentadores da SE VPL, pelo Critério DMA Consumidor.

b) Delta DMA Carga

Figura 13: Resultado da Hierarquização do DMA pela Diferença entre o Valor Ideal e o Valor Real dos Alimentadores da SE VPL, pelo Critério DMA Carga.

c) Delta DMA Híbrido

Figura 14: Resultado da Hierarquização do DMA pela Diferença entre o Valor Ideal e o Valor Real dos Alimentadores da SE VPL, pelo Critério DMA Híbrido.

Alternativamente, pode-se ver os resultados em forma de relatório, conforme mostrado na Figura f5 a seguir, com relação à hierarquização do DMA realizada pela diferença entre o valor ideal do DMA e o seu respectivo real, dos alimentadores da SE VPL, pelo critério DMA consumidor.

DMA Consumidor			
Lista de Circuitos:			
Circuito:	Dma Real:	Dma Ideal	Diferença:
VPL01	0.421	0.828	0.404
VPL02	0.505	0.813	0.307
VPL03	0.806	0.792	0.187
VPL04	0.533	0.755	0.172
VPL10	0.402	0.553	0.151
VPL12	0.769	0.595	0.117
VPL07	0.712	0.616	0.104
VPL05	0.772	0.675	0.103
VPL08	0.120	0.214	0.093
VPL09	0.538	0.603	0.065
VPL11	0.801	0.862	0.060
VPL06	0.768	0.828	0.059
VPL30	0.000	0.000	0.000
VPL31	0.000	0.000	0.000

Data: 30/01/2013

Página: 1/1

Figura 15: Resultado em Forma de Relatório, da Hierarquização do DMA pela Diferença entre o Valor Ideal e o Valor Real dos Alimentadores da SE VPL, pelo Critério DMA Consumidor.

Verifica-se que se o critério escolhido for o do DMA consumidor, o circuito VPL-01 é o que apresenta a maior diferença (0,404) e portanto, maiores ganhos para se realizar uma intervenção, alocando-se os dispositivos de proteção conforme sugeridos pelo DMA ideal.

B. Cálculo do DMA Projeto

Conforme mencionado no final do subitem anterior, após o cálculo do DMA Real e do DMA Ideal, deve-se realizar um estudo mais detalhado do circuito, levando-se em consideração, fatores mais realistas. Assim, utilizando-se a Aba "Projeto" da *Ferramenta DMA*, é possível calcular valores de DMA mais condizentes com as condições reais de campo. A figura 16 a seguir, apresenta o alimentador escolhido VPL-01, para se realizar estes ajustes.

Desempenho máximo do alimentador (DMA)

Importador Propriedades

Alimentador: VPL01

Projeto

Orçamento Disponível (R\$): 0

Eixo relativo para critério de parada: 0.001

Peso da Carga (t): 50

Peso do Consumidor (t): 50

Distância de busca geral (m): 200

Distância de busca para chave freio/garra (m): 200

Variação mínima de consumidor/carga (t): 30

Período de verificação: 10/02/2013

Início de verificação: 12/03/2013

Fim da verificação: 12/03/2013

Confirmar Cancelar Pachto

Figura 19: Janela de Configuração de Propriedades do DMA

- Seleção do alimentador;
- Valor do orçamento disponível;
- Erro relativo do DMA ideal para critério de parada;
- Pesos das variáveis carga e consumidor;
- Período a ser considerado para as ocorrências a serem importadas;
- No caso do DMA projeto, distância para busca de bases-fusíveis (valor default = 200 m);
- No caso do DMA projeto, distância para busca de religadores (valor default = 200 m);
- Variação máxima de associação para consumidor/carga (valor default = 30 %).

Dma: Desempenho máximo do alimentador

Calculo | Resultados | Projeto | Dma Explorer

Alimentador: VPL01

Projeto: Novo Projeto

Ligacoes dltmas

Projeto	Modelo DMA	Valor Real	Valor Ideal	Codigo
				300597-P1
	Consumidor	0.421	0.025	307724-P1
	Carga	0.410	0.021	301851-P1
	Hibrido	0.415	0.022	

Figura 17: Seleção de Parâmetros de Projeto para o Alimentador VPL-01

Figura 18: Nome “PROJETO VPL-01” Escolhido para o Projeto do Alimentador VPL-01.

Após a definição do nome, haverá um processamento realizado de forma automática que estabelecerá uma relação entre as proteções do DMA Projeto e as proteções da rede real (DMA Real). Esta relação se dará conforme a distância elétrica e a variação relativa do trecho frente ao alimentador. A configuração dos parâmetros deve ser feita na Janela de Configuração do DMA, apresentada na figura 19 a seguir.

Figura 20: Relacionamento Estabelecido entre as Proteções do DMA Real e do DMA Projetado.

Na parte esquerda da tela da figura 20, observa-se no item “Ligações do Projeto” que foram associadas 10 (dez) proteções do caso real (incluindo-se o disjuntor), com as proteções do DMA Projetado (O termo *associação* refere-se à aproximação topográfica entre as proteções existentes no campo, com aquelas do projeto do DMA, de acordo com as parametrizações adotadas).

Figura 21: Lista de Protecções Novas e de Protecções Existentes

b) Manter a associação sugerida pelo DMA Projeto das 8 F's: 347675, 347695, 347651, 340362, 340363, 347662, 47692 e 347650, e;

c) Realocar as demais bases-fusíveis.

Figura 22: Alocação de Proteções Sugeridas pelo PROJETO VPL-01

Ao clicar-se no botão , recalcula-se o valor do DMA, considerando-se o rol de providências da figura 22. A figura 23 a seguir apresenta o resultado deste projeto, que resultou no DMA Projetado de 0,722, com custo de realocação de 21 bases-fúteis de R\$ 9.677,85.

Figura 23: Tela de Resultado do PROJETO VPL-01

A tabela 5 apresenta os resultados dos cálculos dos melhores circuitos ranqueados da Subestação VPL, onde se poderão comparar os valores calculados pelo DMA Real, DMA Ideal, DMA Projetado, FEC Real e FEC Projetado.

Tabela 5: Tabela comparativa dos DMA Real, DMA Ideal, DMA Projetado, FEC Real e FEC Projetado.

	DMA			FEC	
Circuito	Real	Ideal	Proj	FEC - Real	FEC - Proj
VPL-02	0,505	0,813	0,807	1,399	0,420
VPL-07	0,712	0,816	0,764	0,459	0,343
VPL-12	0,769	0,886	0,859	0,532	0,474
VPL-06	0,766	0,825	0,815	0,277	0,223
VPL-08	0,120	0,213	0,162	1,093	1,025
VPL-11	0,601	0,662	0,624	0,527	0,513
VPL-01	0,420	0,825	0,722	0,134	1,132
VPL-05	0,772	0,875	0,868	0,359	0,358

Desta forma, observou-se que os alimentadores VPL-2, VPL-07 e VPL-06 são os que apresentaram a maior diminuição percentual do valor de FEC, em relação aos próprios alimentadores. Note-se que a informação da tabela supracitada não estão apresentados os dados referentes aos custos envolvidos para atingir a alocação otimizada. Adicionalmente, para uma análise mais acurada, ponderou-se o FEC pela quantidade de consumidores da subestação. Assim, a tabela 6 a seguir, apresenta os custos da alocação otimizada e o Delta FEC ponderado, além da relação do Custo/FEC Pon-

derado e do Delta DMA (diferença entre o DMA Ideal e DMA Real).

Tabela 6: Tabela de Custo por FEC Ponderado.

Circuito	Delta FEC Pond (%)	Custo (R\$)	Delta DMA	Custo/FEC Pond
VPL-02	69,98	5.069,35	0,308	72,44
VPL-07	25,27	6.912,75	0,104	273,56
VPL-12	10,7	8.756,15	0,117	818,33
VPL-06	19,49	4.147,65	0,059	212,81
VPL-08	6,22	1.382,55	0,093	222,27
VPL-11	2,66	3.225,95	0,061	1.212,76
VPL-01	1,49	9.677,85	0,405	6.495,20
VPL-05	0,28	6.479,61	0,103	23.141,46

Desta forma, ao se analisar a relação entre custo dispendido e diminuição no valor do FEC, o alimentador VPL-02 teria a preferência de intervenção, pois os dispêndios com realocação de dispositivos de proteção são da ordem de R\$ 5.000,00, com uma redução no FEC de cerca de 70 %.

O FEC Ponderado é calculado considerando todos os consumidores da subestação em que o circuito em análise está conectado. Desta forma, observa-se que o Custo/FEC Ponderado será determinante na escolha do alimentador de melhor relação Custo/Benefício, pois com esta informação ter-se-á um balizador de investimento, frente ao ganho no Índice de Continuidade.

Note-se que o circuito com o maior Delta DMA (VPL-01) não foi o mesmo que apresentou o melhor Custo/FEC Ponderado (VPL-02). Isto decorre do fato de que o alimentador VPL-2 apresentou uma melhor relação Custo/Benefício que o alimentador VPL-1, tópico não analisado quando somente se compara apenas o Delta DMA. Ressalte-se assim, a necessidade de estudos mais detalhados para a escolha das alternativas que sejam mais factíveis do ponto de vista financeiro.

Finalmente, ressalte-se a metodologia de alocação otimizada trouxe vários benefícios diretos e indiretos para a concessionária, dentre os quais, um *software* de auxílio na decisão de intervenção de campo para a diminuição dos valores de FEC (Ferramenta DMA). Adicionalmente, o projeto de P&D respectivo propiciou aos seus participantes, a oportunidade de melhoria na capacitação profissional, através de curso de Mestrado, e também da divulgação do trabalho na comunidade técnico-científica, através da submissão de inúmeros artigos para eventos técnicos nacionais e internacionais, ao longo da vigência do projeto de P&D.

V. COMENTÁRIOS FINAIS

No cenário anterior de indicadores técnicos [4], o incentivo de investimentos estava sendo direcionado para que as concessionárias tivessem mais zelo com o conglomerado de unidades consumidoras considerados de forma coletiva

(DEC/FEC), como por exemplo, os bairros residenciais. Com a nova regulamentação [5], e subseqüentes atualizações, a tendência do incentivo à melhoria da confiabilidade está focada principalmente na unidade consumidora, pois como a compensação financeira é proporcional ao consumo da unidade consumidora, a distribuidora será incentivada a atuar mais, por exemplo, nas unidades consumidoras do Grupo A4 (que possuem consumo elevado). Assim, desde o início de 2010, tem havido uma nova visão do foco de atuação das concessionárias, migrando do coletivo para o individual, podendo influenciar nas decisões de alocação de dispositivos de proteção. Desta forma, devido às incertezas de natureza regulatória, que possam afetar as prioridades em termos de continuidade no fornecimento de energia, pode-se implementar uma metodologia que contemple tanto parâmetros relacionados a um certo aglomerado de clientes, quanto parâmetros que avaliam o cliente de forma individual, como por exemplo, a análise de consumidores preferenciais.

A metodologia em sua forma mais simples, tende a considerar apenas a quantidade de clientes protegidos e o comprimento do trecho do alimentador (denominado de *DMA – Consumidor*). Contudo, pode-se, de forma mais abrangente, contemplar vários parâmetros (clientes, demanda, energia consumida, etc), ponderados através de um “Índice de Mérito” (calculado com o auxílio da ponderação). Posteriormente, poder-se-á até cogitar, inclusive, a influência daquela(s) variável(eis) de maior representatividade em cada barra de estudo, através de uma ponderação de caráter dinâmico (variando de barra a barra) numa eventual continuação do projeto.

Ressalte-se que o objetivo primordial desta metodologia é o de identificar e priorizar alimentadores (através de uma classificação) que sejam objeto de uma análise mais criteriosa posteriormente, baseado na relevância das variáveis citadas anteriormente (quantidade de clientes protegidos, comprimento do trecho, ocorrências, etc.). Desta forma, esta ferramenta deverá ser capaz de identificar aqueles circuitos onde haja possibilidade de ganhos, quer seja em investimentos evitados, melhoria da manutenção e dos indicadores de confiabilidade, e consequentemente, redução de multas pecuniárias pagas ao cliente. Finalmente, observe-se que esta metodologia não pretende substituir os estudos convencionais de Proteção para a alocação de elementos de proteção (cálculo de níveis de curto-circuito, seletividade, etc), mas simplesmente, introduz uma variável que, geralmente, não é considerada nos estudos tradicionais de Proteção, tais como, a quantidade de unidades consumidoras ou de ocorrências de um determinado alimentador.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Livros Técnicos:

- [1] C. C. B. Oliveira; N. Kagan; H. P. Schmidt; H. Kagan; "Métodos de Otimização Aplicados a Sistemas Elétricos de Potência", Editora Blucher, 2009, p. 108-111.

Relatórios Técnicos:

- [2] Daimon Engenharia e Sistemas, "RT-2 : Especificação de Metodologia para Avaliação dos Melhores Pontos para Instalação de Dispositivos de Proteção – Versão 3", Projeto de P&D : PD099 - Alocação de Chaves Baseada no Risco Mínimo do Alimentador, CPFL, São Paulo, janeiro de 2013.
- [3] Daimon Engenharia e Sistemas, "RT-6 : Especificação do Software de Otimização dos Pontos Ótimos para Instalação de Dispositivos de Proteção – Versão 2", Projeto de P&D : PD099 - Alocação de Chaves Baseada no Risco Mínimo do Alimentador, CPFL, São Paulo, março de 2013.

Dispositivos Regulatórios:

- [4] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica; Resolução nº 024, de 27 de janeiro de 2000.
- [5] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica; Resolução nº 345, de 16 de dezembro de 2008 - PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica.