



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

MARIA LETÍCIA DE ARAÚJO VERAS

**APLICAÇÃO E ANÁLISE DE METODOLOGIA DE POSICIONAMENTO
EFICIENTE DE DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO E MANOBRA EM REDE AÉREA
DE MÉDIA TENSÃO**

FORTALEZA

2017

MARIA LETÍCIA DE ARAÚJO VERAS

APLICAÇÃO E ANÁLISE DE METODOLOGIA DE POSICIONAMENTO EFICIENTE DE
DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO E MANOBRA EM REDE AÉREA DE MÉDIA TENSÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas Elétricos de Potência.

Orientador: Prof. M.Sc. Lucas Silveira Melo.

FORTALEZA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A69a Araujo Veras, Maria Leticia de.
Aplicação e análise de metodologia de posicionamento eficiente de dispositivos de proteção e manobra em rede aérea de média tensão / Maria Leticia de Araujo Veras. – 2017.
102 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2017.
Orientação: Prof. Me. Lucas Silveira Melo.

1. Eficientização de alocação. 2. DMA. 3. FEC. I. Título.

CDD 621.3

MARIA LETÍCIA DE ARAÚJO VERAS

APLICAÇÃO E ANÁLISE DE METODOLOGIA DE POSICIONAMENTO EFICIENTE DE
DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO E MANOBRA EM REDE AÉREA DE MÉDIA TENSÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Departamento de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal do Ceará, como requisito
parcial à obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Elétrica. Área de concentração:
Sistemas Elétricos de Potência.

Aprovada em: 13/12/2017.

BANCA EXAMINADORA

Prof. M.Sc. Lucas Silveira Melo (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Raimundo Furtado Sampaio
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Engº Rodrigo Paiva Dias Franklin
Operação e Manutenção Regional Metropolitana – Enel Distribuição Ceará

A Deus.

Aos meus pais, Jorge e Raimundita.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por estar presente em todos os momentos da minha vida, abrindo portas e apontando saídas.

Devo um agradecimento especial ao meu orientador e Professor M. Sc. Lucas Melo, que foi fundamental no desenvolvimento deste trabalho. São muitos os elogios que poderia fazer ao Professor que durante este período de orientação sempre se mostrou disposto a ajudar com esclarecimentos de dúvidas e sugestões de melhorias, sempre com boa vontade. É gratificante saber que o Departamento de Engenharia Elétrica conta com um Mestre como Lucas em seu corpo docente.

Agradeço à minha família, pais, irmãos e tia, por minha base e pelos ensinamentos diários que levarei para toda a vida.

Agradeço ao meu namorado Fábio, que conheci no curso de engenharia elétrica, pelo convívio nestes anos da graduação, pela força que dele recebi nos momentos difíceis que vivi nesta jornada, pelo apoio, companheirismo e cumplicidade compartilhados, e por ter me ajudado a alcançar os meus objetivos.

Agradeço aos amigos que fiz durante o curso, onde muitos desses amigos tornaram-se uma segunda família para mim e que pretendo levar para toda a vida. Em especial agradeço aos amigos Allan, Enzo, Felipe Porto, Josias e Tobias, por todas as noites mal dormidas devido aos grupos de estudo que antecediam as provas, e aos amigos Alexcya, Davi Pessôa, Edmundo, Eládio, Raísa e Rodrigo, pela amizade e por todos os momentos vividos.

Agradeço a todos os professores do departamento de engenharia elétrica, pelos ensinamentos e por serem protagonistas nestes cinco anos de graduação.

Agradeço também aos amigos que fiz na Enel Distribuição Ceará durante o estágio, que contribuíram de forma significativa para o meu crescimento pessoal e profissional e que me acolheram tão bem durante este período. Em especial, agradeço aos meus chefes e tutores Alan Bessa, Glauber Abreu e Rodrigo Franklin, que foram de fundamental importância para meu aprendizado, pelos ensinamentos diários, pela disposição para conversar e para tirar dúvidas, pelo incentivo profissional e por serem exemplos para mim.

“A persistência é o menor caminho do êxito.”

(Charles Chaplin)

RESUMO

A busca por energia elétrica com qualidade cresce cada vez mais com o passar dos anos em decorrência do desenvolvimento de novas tecnologias. As distribuidoras de energia elétrica necessitam que seu sistema de fornecimento seja protegido contra faltas visando atender aos seus consumidores e aos requisitos estabelecidos nos procedimentos de redes de distribuição (PRODIST), visto que as concessionárias devem apresentar indicadores de qualidade dentro dos padrões impostos pela ANEEL para atuarem no mercado de energia elétrica. Para a proteção de redes aéreas de média tensão, faz-se uso de equipamentos de proteção e manobra que possibilitem ao sistema operar de forma a melhorar a sua confiabilidade. A disposição destes equipamentos ao longo da rede aérea de média tensão é essencial para a redução do número de clientes afetados devido à faltas, e por consequência, redução do indicador FEC. Com isto, surge a necessidade de sistemas de alocação eficientes de instalação para os equipamentos de proteção e manobra. Dentro deste contexto, o objetivo deste trabalho aplica uma metodologia de desempenho máximo de um alimentador (DMA) para efficientização dos sistemas de proteção e manobra (DPM) de uma rede aérea de média tensão (MT). A metodologia proposta abrange o desenvolvimento de um algoritmo em linguagem de programação Python, considerando os parâmetros de quantidade de clientes protegidos e detecção de faltas em um trecho do alimentador. Os resultados obtidos através do algoritmo desenvolvido serão utilizados para a realização de um comparativo entre a disposição de dispositivos proposta pela concessionária e a proposta neste trabalho, a fim de apresentar um sistema de alocação eficiente para os equipamentos de proteção e manobra, obtido com maior velocidade. Os resultados obtidos apresentarão uma redução do indicador FEC.

Palavras-chave: DMA. FEC. Efficientização de alocação.

ABSTRACT

The search for quality electric energy is growing more and more over the years as a result of the development of new technologies. The electricity distributors need their supply system to be protected against faults in order to meet their consumers and the requirements established in the distribution network procedures (PRODIST), since the concessionaires must present quality indicators within the standards imposed by ANEEL to in the electricity market. For the protection of medium voltage aerial networks, use is made of protection and maneuver equipment that enable the system to operate in a way that improves its reliability. The arrangement of these equipments along the medium voltage aerial network is essential for reducing the number of clients affected due to faults, and consequently reducing the FEC indicator. As a result, there is a need for efficient installation systems for protection and maneuvering equipment. In this context, the objective of this work is to apply a maximum feeder performance (DMA) methodology for the efficiency of the protection and maneuvering (DPM) systems of a medium voltage (MV) air network. The proposed methodology covers the development of an algorithm in Python programming language, considering the number of protected client parameters and fault detection in a feeder segment. The results obtained through the developed algorithm will be used to perform a comparison between the arrangement of devices proposed by the concessionaire and the proposal in this work, in order to present an efficient allocation system for the protection and maneuvering equipment obtained with higher speed. The obtained results will present a reduction of the FEC indicator.

Keywords: DMA. FEC. Allocation efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Importância da eletricidade para a sociedade	14
Figura 1.2 – Esquemático de sistema elétrico de potência.....	15
Figura 2.1 – Chave fusível de isolador de corpo único.....	20
Figura 2.2 – Isolador tipo pedestal.....	20
Figura 2.3 – Porta fusível.....	21
Figura 2.4 – Elo fusível.....	21
Figura 2.5 – Chave seccionadora para uso externo.....	22
Figura 2.6 – Diagrama de operação dos religadores.....	24
Figura 2.7 – Religador Cooper.....	25
Figura 2.8 – Religador Noja.....	26
Figura 2.9 – Seccionalizador ligado à jusante de religador.....	26
Figura 2.10 – Seccionalizador de controle eletrônico.....	27
Figura 2.11 – Chave automática Tavrída.....	28
Figura 2.12 – Chave automática Cooper.....	28
Figura 2.13 – Chave automática VCR.....	28
Figura 2.14 – Chave automática IMS.....	29
Figura 3.1 – Árvore de Busca.....	31
Figura 3.2 – Busca em amplitude.....	32
Figura 3.3 – Busca em profundidade.....	33
Figura 3.4 – Busca em gradiente.....	33
Figura 3.5 – Busca pela melhor escolha.....	34
Figura 3.6 – Fluxograma para a metodologia heurística adotada.....	35
Figura 3.7 – Alimentador exemplo para um dispositivo de proteção.....	36
Figura 3.8 – Variáveis passíveis de implementação do DMA.....	38

Figura 3.9 – Rede Simplificada para Ilustração do DMA.....	38
Figura 3.10 – Rede exemplo com a disposição atual dos DPM.....	39
Figura 3.11 – Rede fictícia com a disposição ideal dos DPM.....	44
Figura 3.12 – Relação do ganho entre DMA atual e DMA ideal.....	45
Figura 3.13 – Curva característica para o desempenho máximo do alimentador.....	45
Figura 4.1 – Grafo simples e sua representação matricial em RNP.....	48
Figura 4.2 – Representação de grafo em RNP.....	49
Figura 4.3 – Operação de poda no grafo representado na Figura 4.2.....	49
Figura 4.4 – Operação de inserção no grafo representado na Figura 4.2.....	49
Figura 4.5 – Fluxograma para representação dos processos do algoritmo.....	55
Figura 5.1 – Alimentador exemplo.....	58
Figura 5.2 – Alocação dos DPM para hipótese 1.....	59
Figura 5.3 – Alocação dos DPM para hipótese 2.....	59
Figura 5.4 – Alimentador PCJ01P4.....	60
Figura 5.5 – Representação unifilar do alimentador PCJ01P4.....	61
Figura 5.6 – Disposição dos pontos indicados pelo método do biproduto.....	62
Figura 5.7 – Disposição dos pontos indicados pelo método do DMA.....	63
Figura 5.8 – Ocorrência de situação 1 – Biproduto.....	64
Figura 5.9 – Primeira manobra para a situação 1 - Biproduto.....	65
Figura 5.10 – Segunda manobra para a situação 2 – Biproduto.	65
Figura 5.11 – Ocorrência de situação 2 - Biproduto.....	66
Figura 5.12 – Primeira manobra para a situação 2 – Biproduto.....	66
Figura 5.13 – Ocorrência de situação 3 - Biproduto.....	67
Figura 5.14 – Primeira manobra para a situação 3 – Biproduto.....	67
Figura 5.15 – Ocorrência de situação 4 - Biproduto.....	68

Figura 5.16 – Primeira manobra para a situação 4 – Biproducto.....	68
Figura 5.17 – Ocorrência de situação 5 - Biproducto.....	69
Figura 5.18 – Primeira manobra para a situação 5 – Biproducto.....	70
Figura 5.19 – Segunda manobra para a situação 5 – Biproducto.....	70
Figura 5.20 – Ocorrência de situação 6 – Biproducto.....	71
Figura 5.21 – Ocorrência de situação 7 - Biproducto.....	71
Figura 5.22 – Primeira manobra para a situação 7 – Biproducto.....	72
Figura 5.23 – Ocorrência de situação 1 – DMA.....	73
Figura 5.24 – Primeira manobra para a situação 1 – DMA.....	73
Figura 5.25 – Segunda manobra para a situação 1 - DMA.....	74
Figura 5.26 – Terceira manobra para a situação 1 – DMA.....	74
Figura 5.27 – Ocorrência de situação 2 - DMA.....	75
Figura 5.28 – Ocorrência de situação 3 – DMA.....	75
Figura 5.29 – Primeira manobra para a situação 3 - DMA.....	76
Figura 5.30 – Ocorrência de situação 4 - DMA.....	76
Figura 5.31 – Primeira manobra para a situação 4 – DMA.....	77
Figura 5.32 – Segunda manobra para a situação 4 – DMA.....	77
Figura 5.33 – Ocorrência de situação 5 - DMA.....	78
Figura 5.34 – Primeira manobra para a situação 5 – DMA.....	78
Figura 5.35 – Ocorrência de situação 6 – DMA.....	79
Figura 5.36 – Primeira manobra para a situação 6 – DMA.....	79
Figura 5.37 – Ocorrência de situação 7 - DMA.....	80
Figura 5.38 – Primeira manobra para a situação 7 – DMA.....	80
Figura 5.9 – Comparativo entre os resultados obtidos.....	81

LISTA DE ALGORITMOS

Algoritmo 4.1 – Definição da topologia da rede.....	51
Algoritmo 4.2 – Cálculo do total de clientes e comprimento total do alimentador.....	51
Algoritmo 4.3 – Definição do número de equipamentos a serem projetados.....	51
Algoritmo 4.4 – Definição de nós a jusante.....	52
Algoritmo 4.5 – Realização de poda.....	52
Algoritmo 4.6 – Percorrer os nós que possuem proteção associada.....	53
Algoritmo 4.7 – Cálculo do número de consumidores à montante de um nó ate a proteção mais próxima.....	54
Algoritmo 4.8 – Cálculo da distância à jusante de um nó até a proteção mais próxima.....	54
Algoritmo 4.9 – Cálculo do DMA.....	54
Algoritmo 4.10 – Indicação dos pontos eficientes de instalação para o DPM.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Estatísticas para os tipos de faltas e suas composições.....	23
Tabela 3.1 – Consumidores afetados pelo defeito em cada trecho	39
Tabela 3.2 – Consumidores e distância entre os trechos à montante do ponto em análise.	40
Tabela 3.3 – Cálculo do DMA para alocação do DPM1.....	41
Tabela 3.4 – Cálculo do DMA para alocação do DPM2.....	42
Tabela 3.5 – Cálculo do DMA para alocação do DPM3.....	42
Tabela 3.6 – Cálculo do DMA para alocação do DPM4.....	43
Tabela 4.1 – Representação de vizinhos na base de dados.....	50
Tabela 5.1 – Valores de biproduto para hipóteses.....	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
DMA	Desempenho Máximo de um Alimentador
DPM	Dispositivos de Proteção e Manobra
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
GREI	Grupo de Redes Elétricas Inteligentes
MT	Média Tensão
RNP	Representação Nó-Profundidade
SEP	Sistema Elétrico de Potência

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Justificativa.....	15
1.2	Objetivos.....	16
1.3	Metodologia.....	17
1.4	Estrutura do trabalho.....	17
2	DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO E EQUIPAMENTOS DE MANOBRA.....	19
2.1	Chave Fusível.....	19
2.2	Chave Seccionadora.....	21
2.3	Religador.....	22
2.4	Seccionalizador.....	26
2.5	Chaves de manobra telecomandadas.....	27
2.6	Chaves automáticas.....	29
2.7	Considerações do capítulo.....	30
3	METODOLOGIA ADOTADA PARA DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO DE POSICIONAMENTO EFICIENTE.....	31
3.1	Métodos de busca heurística.....	31
3.1.1	<i>Técnicas de busca heurística.....</i>	32
3.1.1.1	<i>Busca em amplitude.....</i>	32
3.1.1.2	<i>Busca em profundidade.....</i>	32
3.1.1.3	<i>Busca em gradiente.....</i>	33
3.1.1.4	<i>Busca pela melhor escolha.....</i>	33
3.1.2	<i>Escolha de utilização do método de busca em profundidade.....</i>	34
3.2	Critério de desempenho máximo de um alimentador.....	35
3.3	Considerações finais.....	45
4	DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO PARA CÁLCULO DO DESEMPENHO MÁXIMO DE UM ALIMENTADOR.....	47
4.1	MyGrid.....	47
4.1.1	<i>Representação nó-profundidade (RNP)</i>	47
4.1.2	<i>Módulos de atuação da biblioteca Mygrid.....</i>	48

4.2	Desenvolvimento do algoritmo de efficientização dos pontos de alocação dos DPM.....	50
4.2.1	<i>Base de dados.....</i>	50
4.2.2	<i>Cálculo da quantidade total de clientes e comprimento total do alimentador..</i>	51
4.2.3	<i>Definição do número de equipamentos a serem projetados.....</i>	51
4.2.4	<i>Definição dos nós à jusante com equipamentos alocados.....</i>	52
4.2.5	<i>Realização de poda.....</i>	52
4.2.6	<i>Cálculo do DMA.....</i>	53
4.2.7	<i>Representação dos processos para definição dos pontos de alocação dos DPM.....</i>	55
4.3	Considerações do capítulo.....	56
5	SIMULAÇÕES E RESULTADOS.....	57
5.1	Metodologia de biproducto.....	57
5.2	Apresentação dos pontos propostos.....	60
5.2.1	<i>Apresentação dos pontos de alocação de DPM através do método do biproducto.....</i>	61
5.2.2	<i>Apresentação dos pontos de alocação de DPM através do método do DMA....</i>	62
5.3	Análise comparativa.....	63
5.4	Simulações e resultados.....	63
5.4.1	<i>Simulação do FEC para a metodologia do biproducto.....</i>	64
5.4.1.1	<i>Situação 1.....</i>	64
5.4.1.2	<i>Situação 2.....</i>	65
5.4.1.3	<i>Situação 3.....</i>	67
5.4.1.4	<i>Situação 4.....</i>	68
5.4.1.5	<i>Situação 5.....</i>	69
5.4.1.6	<i>Situação 6.....</i>	70
5.4.1.7	<i>Situação 7.....</i>	71
5.4.2	<i>Simulação do FEC para a metodologia do DMA.....</i>	72
5.4.2.1	<i>Situação 1.....</i>	72
5.4.2.2	<i>Situação 2.....</i>	74
5.4.2.3	<i>Situação 3.....</i>	75
5.4.2.4	<i>Situação 4.....</i>	76
5.4.2.5	<i>Situação 5.....</i>	77

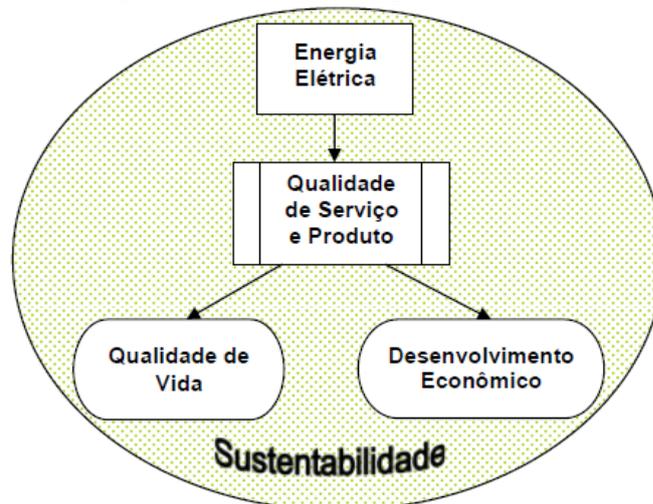
5.4.2.6	<i>Situação 6</i>	78
5.4.2.7	<i>Situação 7</i>	79
5.5	Comparação entre os valores de FEC para biproduto e DMA	81
5.6	Considerações do capítulo	82
6	CONCLUSÃO	83
	REFERÊNCIAS	85
	APÊNDICE A – BASE DE DADOS DO ALIMENTADOR PCJ01P4	87
	APÊNDICE B – ALGORITMO DESENVOLVIDO NO PYTHON PARA EFICIENTIZAÇÃO DOS PONTOS DE INSTALAÇÃO DE DPM	91
	APÊNDICE C – ALIMENTADOR EM REPRESENTAÇÃO DE GRAFO EM NÓ-PROFUNDIDADE	96
	ANEXO A – ALGORITMO DESENVOLVIDO NO PYTHON PARA EFICIENTIZAÇÃO DOS PONTOS DE INSTALAÇÃO DE DPM	97

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica possui grande importância no cenário mundial devido à dependência cada vez maior das pessoas em relação à tecnologia e à informação, além de possibilitar à sociedade, melhor qualidade de vida. Apesar do decréscimo do consumo de energia elétrica ocorrido no ano de 2016, há uma previsão que ocorra um aumento no consumo de energia elétrica de aproximadamente 3,5% anuais até 2021 (EPE, 2016).

Com o aumento do consumo da energia elétrica cresce também a necessidade dos consumidores em receber energia de qualidade e sem interrupções. Conforme apresentado na Figura 1.1, o desenvolvimento econômico assim como a qualidade de vida das pessoas, depende da energia elétrica.

Figura 1.1 – Importância da eletricidade para a sociedade



Fonte: LEÃO (2015)

Neste contexto destacam-se os procedimentos de redes de distribuição (Prodinst), que são documentos elaborados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) que normatizam e padronizam o funcionamento e desempenho do sistema elétrico de potência (SEP). O módulo 8 do Prodinst descreve os procedimentos relativos à qualidade de energia definindo indicadores de qualidade de produto e qualidade de serviço. Os principais indicadores de continuidade nos conjuntos de unidades consumidoras são o DEC e o FEC.

DEC = duração equivalente de interrupção por unidade consumidora, expressa em horas e centésimos de hora, de acordo com a equação 1:

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

FEC = frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora, expressa em número de interrupções e centésimos do número de interrupções, de acordo com a equação 2:

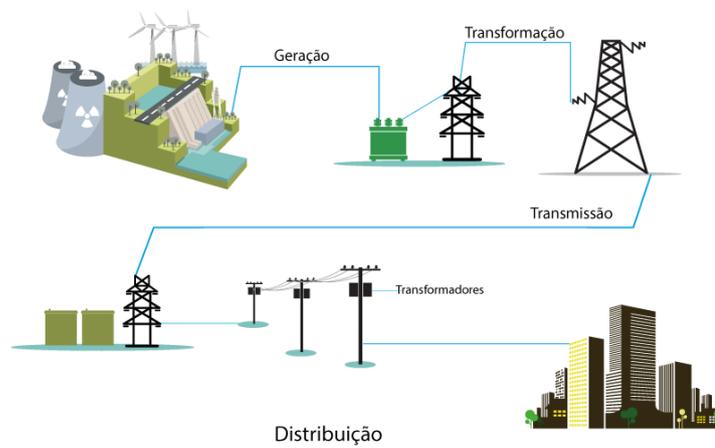
$$FEC = \frac{\sum_{i=1}^{Cc} IC(i)}{Cc} \quad (2)$$

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.
 - i : Índice de unidades consumidoras atendidas em BT ou MT faturadas do conjunto;
 - Cc : Número total de unidades consumidoras faturadas do conjunto no período de apuração, atendidas em BT ou MT;
- (ANEEL, 2017)

O objetivo do sistema elétrico de potência é gerar, transmitir e distribuir energia elétrica atendendo a determinados padrões de confiabilidade, disponibilidade, qualidade, segurança e custos, com o mínimo impacto ambiental e o máximo de segurança pessoal (LEÃO, 2015). Neste cenário, algumas propriedades básicas de proteção devem estar presentes em um SEP para possibilitar um melhor desempenho das redes aéreas de distribuição, através de equipamentos de proteção e manobra que permitam a entrega de energia elétrica de qualidade aos consumidores. Na Figura 1.2 é ilustrado um representativo do sistema elétrico de potência.

Figura 1.2 – Esquemático de um sistema elétrico de potência



Fonte: GERADORA (2017)

1.1 Justificativa

A busca pelo fornecimento de energia de qualidade e diminuição dos indicadores de continuidade promove nas concessionárias a necessidade de crescentes investimentos em equipamentos de proteção e manobra nos alimentadores de distribuição, fazendo com que o

sistema torne-se cada vez mais robusto e capaz de reduzir o número de clientes afetados, assim como o tempo de atendimento dos consumidores.

Na concessionária Enel Distribuição Ceará, surgiu o projeto telecontrole, que consiste em automatizar a rede aérea de distribuição visando a redução do número de clientes afetados em situações de faltas. O projeto foi desenvolvido por colaboradores italianos e teve início no ano de 2015 e terá expectativa de conclusão em 2018.

O critério utilizado para definição dos pontos de alocação dos dispositivos de proteção e manobra pela concessionária é o de biproduto. Este critério visa posicionar os dispositivos ao longo do trecho do alimentador, de forma empírica, determinando de duas a três disposições diferentes de alocação. Posteriormente realiza-se o produto entre os valores de clientes e distância nos trechos entre dispositivos, onde o valor total para cada disposição, será a soma total dos valores individuais calculados. A melhor disposição corresponderá àquela que possuir o menor valor da soma total encontrada.

Para um estudo mais aprofundado para determinação dos pontos de alocação dos dispositivos de proteção e manobra, é necessário a utilização de um critério que analise todos os possíveis pontos que possam receber um dispositivo que proteja a rede elétrica de distribuição de modo a minimizar a quantidade de clientes afetados.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo propor a utilização do método de busca em profundidade para proposições de posicionamentos eficientes de dispositivos de proteção e manobra (DPM) em redes aéreas de distribuição na média tensão (MT), com base em parâmetro previamente selecionados, como área a ser protegida e número de clientes não afetados pela situação da proteção, utilizando o indicador de desempenho máximo de um alimentador (DMA). O algoritmo utilizado foi implementado utilizando a linguagem de programação Python e a biblioteca MyGrid. Após obtidos os resultados será realizada a comparação entre os pontos propostos para alocação de equipamentos pelo algoritmo com os pontos de alocação já existentes no alimentador escolhidos através do método do biproduto. Como resultados serão apresentados o impacto do ganho em relação ao FEC.

1.3 Metodologia

Neste trabalho serão utilizados os conceitos de metodologia heurística de busca em profundidade, assim como o critério de desempenho máximo de um alimentador (DMA), definidos e descritos no Capítulo 3.

A realização do estudo de caso é realizado no alimentador PCJ01P4, pertencente à subestação de Pacajus, localizado no município de Pacajus-CE, objetivando apresentar o desenvolvimento do processo e apresentar com melhor clareza os resultados obtidos na indicação dos pontos eficientes para instalação dos equipamentos de proteção, foram adotados os seguintes critérios:

- a) Coleta dos dados de clientes e distâncias do alimentador PCJ01P4, utilizando o banco de dados da concessionária Enel Distribuição Ceará;
- b) Considerar os possíveis pontos de instalação dos dispositivos de proteção e manobra nas estruturas que possuem chaves fusíveis, chaves seccionadoras e transformadores;
- c) Definição da quantidade de dispositivos de proteção e manobra (DPM) no alimentador PCJ01P4 com base no existente na rede aérea de MT, que neste estudo adotou-se a quantidade de equipamentos pré-dispostos pelo projeto telecontrole;
- d) Utilização da linguagem de programação Python para encontrar os pontos ótimos de instalação dos equipamentos através do método heurístico de busca em profundidade e utilizando o conceito de DMA;
- e) Análise dos resultados obtidos para a realização de uma comparação entre os pontos propostos neste trabalho com os pontos determinados pelo método do biproduto, analisando o ganho do alimentador em FEC.

1.3 Estrutura do trabalho

O trabalho está estruturado em sete Capítulos, que abordam de forma descritiva os aspectos necessários para a melhor compreensão do processo realizado, conforme descritos a seguir.

No Capítulo 1 é apresentado o contexto, a motivação, os objetivos e a metodologia nos quais o trabalho está inserido.

O Capítulo 2 descreverá os principais dispositivos de proteção e manobra, presentes nas redes de distribuição da concessionária Enel Distribuição Ceará, detalhando seus principais componentes, funcionamento e modo de atuação.

O Capítulo 3 explicará a metodologia adotada para o desenvolvimento deste trabalho, explicando a metodologia heurística e o critério de desempenho máximo de um alimentador.

O Capítulo 4 detalhará o processo de desenvolvimento do código realizado para a obtenção dos pontos ótimos de instalação dos equipamentos de proteção, na linguagem de programação Python.

O Capítulo 5 apresentará o estudo de caso realizado em um dado alimentador da subestação de Pacajus, através do código desenvolvido em Python, comparando os pontos de instalação dos equipamentos de proteção sugeridos pelo biproduto com os pontos de instalação resultantes do algoritmo.

O Capítulo 6 mostrará o comparativo em relação ao FEC, um dos principais indicadores para a concessionária, de modo a apresentar o ganho encontrado utilizando a metodologia de DMA, adotada para a execução deste trabalho.

O Capítulo 7 apresentará as conclusões obtidas após a análise dos resultados.

2 DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO E EQUIPAMENTOS DE MANOBRA

Os dispositivos de proteção e equipamentos de manobra são dispositivos responsáveis pela proteção do sistema elétrico através de processos de abertura e fechamento, impedindo quando necessário a passagem de corrente elétrica da carga para a fonte. Podem ser disjuntores, religadores, seccionadores ou chaves fusíveis (MAMEDE, 2013).

Neste Capítulo serão caracterizados os principais equipamentos de proteção e manobra presentes nos alimentadores da Enel Distribuição Ceará.

2.1 Chave fusível

A Chave fusível é um equipamento destinado à proteção contra sobrecorrentes em circuitos primários, utilizada em redes aéreas de distribuição, urbanas e rurais e em pequenas subestações de consumidores e da concessionária (MAMEDE, 2013).

A abertura do dispositivo ocorre quando houver sobrecorrente no trecho por ele protegido através da extinção do arco elétrico, produzido a partir da fusão do elo-fusível, por meio de gases desionizantes gerados no tubo protetor ao elo. Após a operação o porta fusível é levado automaticamente a uma posição de abertura que assegura a distância de isolamento especificada e dá uma indicação visível que o dispositivo operou (NBR 5459), além de isolar o trecho com falta.

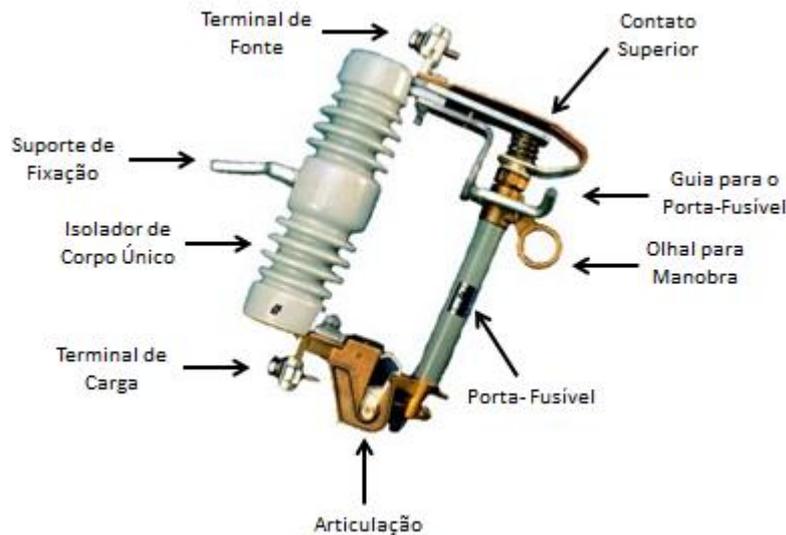
A recomposição do equipamento é realizada de forma manual através da reposição do elo fusível na chave de proteção com dimensões equivalentes àquelas pré-definidas em estudo de coordenação, utilizando vara de manobra. Desta forma, haverá a restauração dos clientes afetados e a nova atuação da chave fusível ao detectar sobrecorrentes no trecho protegido.

As chaves fusíveis são equipamentos de proteção de baixo custo para as concessionárias e, portanto maior empregabilidade do que outros dispositivos. Os principais componentes de uma chave fusível são definidos a seguir.

Os isoladores são elementos empregados para suportar os impactos físicos causados pelas operações de abertura e fechamento realizados pela chave fusível. São geralmente compostos por porcelana vitrificada e podem ser dos tipos corpo único e pedestal. O isolador de corpo único é utilizado em chaves fusíveis que possuam limite de corrente de

até 200 A, mostrado na Figura 2.1, enquanto o isolador do tipo pedestal é utilizado normalmente em subestações de 69 kV, mostrado na Figura 2.2.

Figura 2.1 – Chave fusível de isolador de corpo único



Fonte: Adaptação de Adolpho (2016)

Figura 2.2 – Isolador tipo pedestal



Fonte: ISOLADOR (2016)

Cartucho ou porta-fusível consiste em um tubo de fibra de vidro ou fenolite, dotado de um revestimento interno que, além de aumentar a robustez do tubo, se constitui na substância principal que gera, em parte, os gases destinados à interrupção do arco. Todas as vezes que a chave fusível opera em serviço, ocorre uma pequena erosão no revestimento interno do tubo, porém as suas características permanecem inalteradas por um longo período, durante muitas operações (MAMEDE, 2013).

Este elemento é o responsável por indicar visualmente a atuação do equipamento devido a suspensão que ocorre no cartucho ao detectar sobrecorrentes. O porta-fusível é mostrado na Figura 2.3.

Figura 2.3 – Porta fusível



Fonte: Balestro (2014)

Os elos fusíveis são a parte ativa da chave fusível, ou seja, são os elementos sensores que detectam a sobrecorrente e juntamente com o cartucho, interrompem o circuito. Não devem fundir com a corrente de carga do equipamento ou do circuito protegido e devem obedecer as curvas características tempo x corrente fornecidas pelos fabricantes (JOSEN, 2017).

Os elos fusíveis de má qualidade constituem um grande transtorno para as concessionárias de energia elétrica, devido a sua queima intempestiva, sem que nenhuma anomalia tenha ocorrido no sistema, acarretando custos adicionais de manutenção, perda de faturamento e comprometendo a imagem da empresa junto aos seus consumidores (MAMEDE, 2013).

Figura 2.4 – Elo fusível



Fonte: CRISMEG (2014)

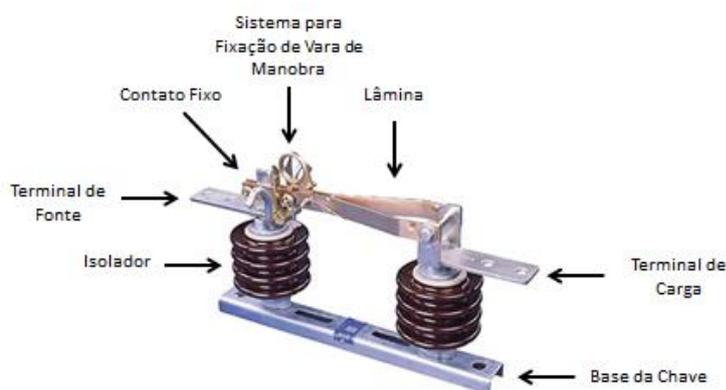
2.2 Chave seccionadora

Segundo a NBR 6935, seccionador é um equipamento mecânico de manobra capaz de abrir e fechar o circuito quando uma corrente de “intensidade desprezível” é interrompida ou reestabelecida ou quando não ocorre variação de tensão significativa através dos terminais de cada polo do seccionador. É também capaz de conduzir correntes sob

condições normais do circuito e, durante o tempo especificado, correntes sob condições anormais, tais como curto-circuito.

As chaves seccionadoras “[...] são utilizadas em redes aéreas de distribuição urbana e rural com a finalidade de seccionar os alimentadores durante os trabalhos de manutenção ou realizar manobras diversas previstas pela operação.” (MAMEDE, 2013). Além disso, os seccionadores são utilizados como *by-pass* e isolamento de equipamentos presentes na rede aérea de distribuição e como chaves de transferência instaladas em encontros de alimentadores. A Figura 2.5 mostra detalhes de uma chave seccionadora utilizada no sistema elétrico de distribuição.

Figura 2.5 – Chave seccionadora para uso externo



Fonte: Adaptado de DELMAR (2014)

É usual que os seccionadores presentes na rede de distribuição sejam monopolares, mas podem existir seccionadores tripolares, que são mais utilizados em subestações do sistema elétrico.

Os seccionadores presentes nas redes aéreas de distribuição podem ser operados de forma manual ou motorizada. Na forma manual a operação da chave é realizada utilizando varas de manobra para a movimentação do mecanismo articulado. Na forma motorizada, as chaves podem ser operadas remotamente através de dispositivos de controle, controladas pelo centro de controle da concessionária, mas também podem ser operados manualmente caso existam problemas com o controle motorizado.

2.3 Religador

Segundo a NBR 8177, religador é um equipamento de proteção contra sobrecorrente, automático, destinado a abrir e religar uma ou mais vezes um circuito de corrente alternada, de acordo com uma sequência de operação predeterminada. O religador de

linha é o nome atribuído aos religadores utilizados nas redes aéreas de distribuição, cujo objetivo é o de eliminar faltas temporárias que possam ser resolvidas sem a necessidade de deslocamento de uma equipe até o local.

Os religadores podem ser classificados quanto ao número de fases que devem proteger, em monofásicos ou trifásicos, e quanto ao sistema de controle presente no equipamento, controlado por ação eletromagnética e multifunção baseados em microprocessados. O controle por ação eletromagnética é realizado através de uma bobina série responsável por abrir os contatos do religador ao identificar sobrecorrentes. O controle eletrônico possui um sistema mais inteligente capaz de operar conforme ajustes de corrente de acionamento, número de disparos e curva de atuação que devem ser calculadas previamente para possibilitar que o equipamento funcione de acordo com a necessidade e seletividade do sistema. Os religadores com controle eletrônico são comumente utilizados na rede aérea de distribuição por possibilitarem ajuste na coordenação amperimétrica com outros equipamentos.

Na Tabela 2.1 é mostrada a contribuição de ocorrências permanentes e transitórias para cada tipo de faltas na rede área de distribuição, retratando a importância dos religadores automáticos para reestabelecer o sistema de forma rápida quando ocorrerem faltas transitórias. A partir da tabela é possível observar que a contribuição para as faltas no sistema elétrico é maior pelo tipo fase-terra, com 79% de ocorrências, onde apenas 11% de ocorrências são de contribuições do tipo bifásicas e 2% tipo trifásicas. As faltas tipo fase-terra são compostas de 80% por defeitos transitórias, enquanto apenas 20% por defeitos permanentes. Já nas faltas tipo bifásicas e trifásicas, a contribuição de faltas permanentes é maior que faltas transitórias.

Tabela 2.1 – Estatísticas para os tipos de faltas e suas composições

Tipo	% de Ocorrência	Permanentes (%)	Transitórias (%)
Trifásicas	2	95	5
Bifásicas	11	70	30
Fase-terra	79	20	80
Outros	08	-	-

Fonte: LEÃO (2015)

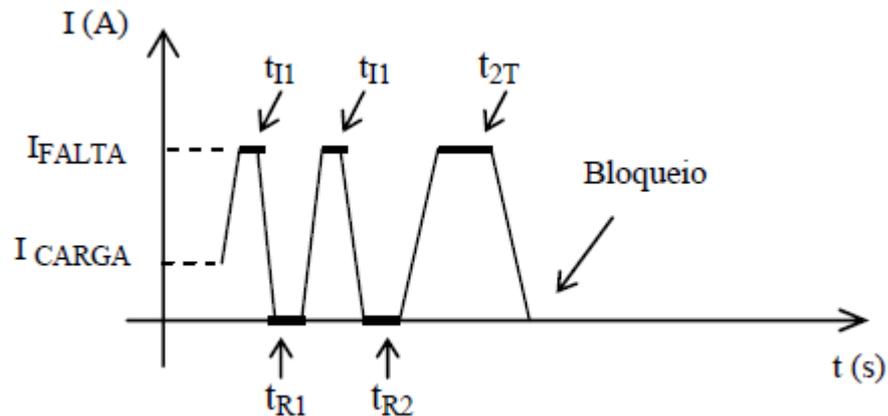
O funcionamento do religador consiste em realizar operações de abertura e fechamento de seus contatos sempre que detectar correntes de curto-circuito no trecho que protege. O processo de operações do religador consiste basicamente em quatro estágios com tempos e quantidade de operações pré-definidas através de estudo de coordenação. O tempo de religamento, denominado tempo morto, consiste no tempo que o equipamento leva para

realizar um novo processo de operação através do fechamento de seus contatos (KINDERMANN, 2013).

Se uma falta provocar a atuação de um religador, este equipamento realizará a abertura de seus contatos de forma instantânea, e a partir de então inicia o processo de temporização para as próximas aberturas temporizadas. Se a falta não persistir antes do fim de todas as contagens, o equipamento volta a sua posição inicial, pronto para atuar novamente. Caso contrário, o dispositivo abrirá seus contatos permanentemente até que a equipe de manutenção reestabeleça o sistema.

Na Figura 2.6, os tempos t_{R1} e t_{R2} correspondem aos tempos de interrupção do relé de sobrecorrente, os tempos t_{I1} e t_{I1} correspondem aos tempos de religamentos instantâneos do mecanismo e o tempo t_{2T} corresponde ao tempo de religamento temporizado.

Figura 2.6 – Diagrama de operação dos religadores



Fonte: MACEDO (2013)

As operações instantâneas e temporizadas dos religadores correspondem aos tempos de abertura e fechamento dos contatos do equipamento, em que a primeira abertura e fechamento é chamada de operação instantânea, com objetivo de eliminar a falta antes de outras proteções à jusante. Caso a falta continue são realizadas mais operações que agora possuem uma temporização pré-definida por coordenação. Segundo Mamede (2013) os religadores podem ser ajustados com as seguintes operações:

- Uma operação instantânea e três temporizadas;
- Duas operações instantâneas e duas temporizadas;
- Três operações instantâneas e uma temporizada;
- Quatro operações instantâneas.

Existem diversos modelos de religadores devido o grande número de fabricantes do equipamento. A seguir serão apresentados os tipos de religadores mais utilizados na rede aérea de média tensão da concessionária Enel Distribuição Ceará.

A unidade de controle do religador Cooper pode ser alimentada através de um transformador de potência ou através da rede de baixa tensão. A unidade de controle permite o envio de sinais de abertura e fechamento do dispositivo, além de possibilitar o monitoramento do estado do religador. A operação deste equipamento é realizada via painel frontal pelo operador ou através de comandos remotos, com comunicação realizada via protocolos integrados ao SCADA.

O religador Cooper possui dois modelos usais, o Form5 e o Form 6, ambos possuem a mesma estrutura apresentada na Figura 2.7. A diferença entre estes dois modelos está apenas no acesso ao controle, em que no modelo Form5 o acesso é realizado apenas pela parte frontal do dispositivo, enquanto no modelo Form6 o acesso é possível tanto pela parte frontal quanto pela parte traseira do dispositivo.

Figura 2.7 – Religador Cooper



Fonte: ENEL DISTRIBUIÇÃO CEARÁ (2017)

A unidade de controle do religador Noja é realizada a partir de capacitores localizados na cabine de controle. Na Figura 2.8 é ilustrado um religador tipo Noja.

Figura 2.8 – Religador Noja



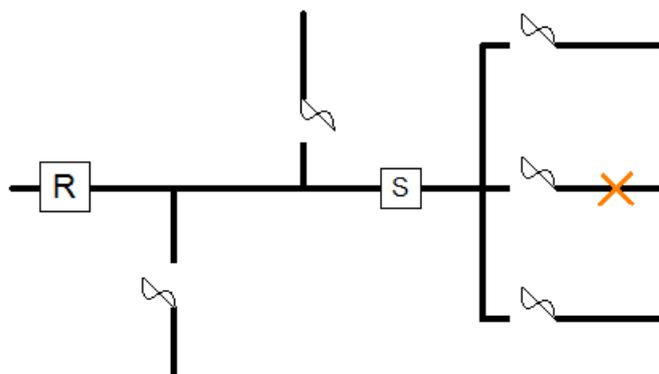
Fonte: NOJA POWER (2017)

2.4 Seccionalizador

Segundo Mamede (2013) os seccionalizadores são equipamentos de proteção utilizados em redes aéreas de distribuição e que têm a finalidade de seccionar definitivamente um trecho do alimentador, quando ocorre um defeito a jusante de sua instalação e cuja interrupção é efetuada por equipamento de retaguarda. Estes equipamentos não possuem proteção contra correntes de curto-circuito.

De acordo com o alimentador ilustrado na Figura 2.9, caso ocorra uma falta no ponto X do sistema, a sobrecorrente será detectada tanto pelo seccionizador quanto pelo religador, em que a atuação da chave seccionalizadora ocorre após um determinado número de contagens de abertura do religador.

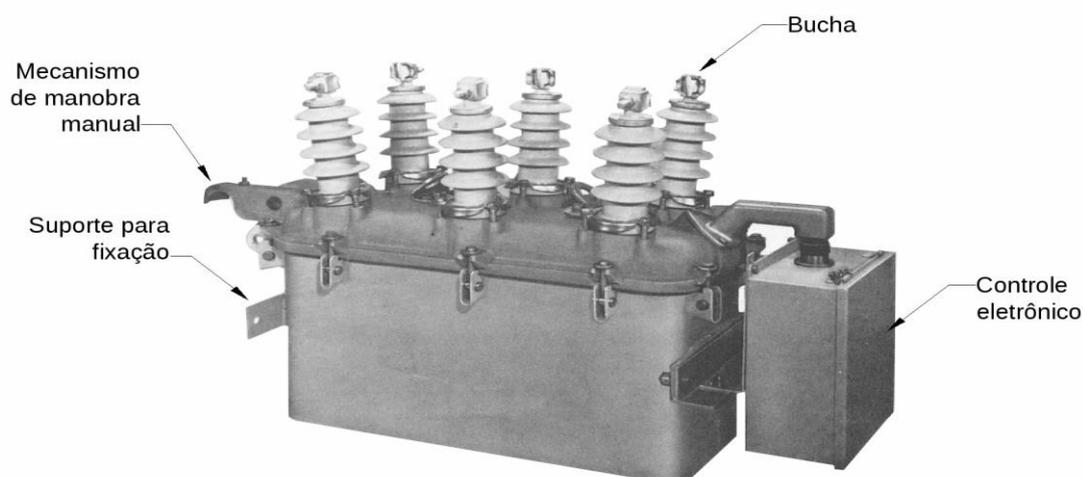
Figura 2.9 – Seccionizador ligado à jusante do religador



Fonte: ALVES (2009)

Assim como os religadores, os seccionalizadores podem ser classificados em monofásicos e trifásicos, a depender do número de fases do circuito a ser protegido, e quanto ao sistema de controle, que pode ser hidráulico ou eletrônico, em que ambos possuem funcionamento similar aos religadores de controle por ação eletromagnética e controle eletrônico, respectivamente. A Figura 2.10 mostra um seccionizador de controle eletrônico, equipamento mais utilizado no sistema aéreo de distribuição.

Figura 2.10 – Seccionizador de controle eletrônico



Fonte: MAMEDE (2013)

2.5 Chaves de manobra telecomandadas

As chaves de manobra telecomandadas são equipamentos geralmente utilizados em encontros de alimentadores, e são responsáveis por permitir manobrar cargas de um circuito para outro de forma local ou remota. O funcionamento destes dispositivos é similar ao funcionamento das chaves seccionadoras, podendo também vir a serem instaladas ao longo dos troncos de alimentadores.

Das chaves de manobra telecomandadas utilizadas pela Enel Distribuição Ceará, as de três fabricantes estão amplamente presentes na rede, são elas: Chave Tavrida, Chave Cooper e Chave VCR, mostradas nas Figuras 2.11, 2.12 e 2.13.

Figura 2.11 – Chave automática Tavrida



Fonte: Própria

Figura 2.12 – Chave automática Cooper



Fonte: Própria

Figura 2.13 – Chave automática VCR



Fonte: Enel Distribuição Ceará (2017)

2.6 Chaves automáticas

As chaves automáticas IMS são dispositivos de proteção e manobra, responsáveis por realizar o seccionamento da rede em carga normal e em ocorrências de curto-circuito. Estas chaves possuem comportamento semelhante ao do seccionador sendo portanto, instalados à jusante do religador.

O funcionamento deste equipamento é realizado por meio de um ajuste de *pick-up* para fase a para neutro, que ao ser sensibilizado por uma sobrecorrente envia alarme ao operador do sistema. Ao atuar, a chave automática aguarda a realização do ciclo de operação do religador, e logo então, secciona a rede, isolando o defeito.

Estas chaves são constituídas basicamente por um polo IMS, responsável por realizar o seccionamento da rede, um sensor de corrente denominado RGDAT, responsável pela medição de correntes, e pelo módulo UP, que corresponde a unidade responsável pela lógica do equipamento.

As chaves automáticas são muito importantes para a automatização da rede, proporcionando velocidade e continuidade do sistema elétrico, pois além de possibilitarem a redução do número de clientes afetados por uma falta através da atuação de um religador, possuem a vantagem de ser telecomandadas, ou seja, operar através do centro de controle da concessionária, otimizando o tempo médio de atendimento ao consumidor. Na Figura 2.14 é apresentada uma chave automática em operação.

Figura 2.14 – Chave automática IMS



Fonte: Própria

2.7 Considerações do capítulo

Neste capítulo foram apresentadas as características dos principais dispositivos de proteção e equipamentos de manobra presentes na rede aérea de média tensão da concessionária Enel Distribuição Ceará. No próximo capítulo será apresentada a metodologia adotada para a realização e desenvolvimento do algoritmo de posicionamento eficiente para os dispositivos de proteção e equipamentos de manobra.

3 METODOLOGIA ADOTADA PARA DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO DE POSICIONAMENTO EFICIENTE

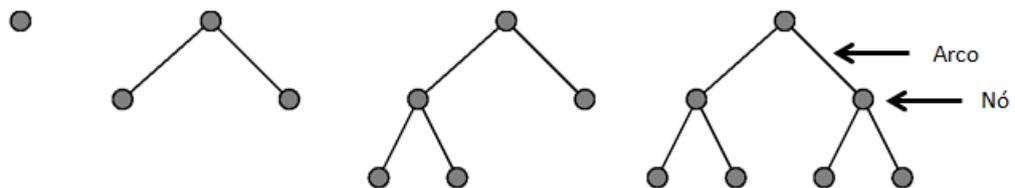
Neste capítulo são apresentadas os métodos heurísticos e de desempenho máximo de um alimentador (DMA) utilizadas para escolha eficiente dos pontos de instalação dos equipamentos de proteção e manobra na rede de média tensão.

3.1 Métodos de busca heurística

Métodos de busca heurística são técnicas utilizadas para otimizar ou encontrar soluções para determinados problemas. Segundo Nelson Kagan (2009) a heurística pode ser definida como uma técnica que, baseada em informações específicas do domínio de um problema, permite melhorar a eficiência de um processo de busca.

Segundo Marques (2013) um grafo consiste de um conjunto finito de pontos, denominados nós interligados ou não por linhas, denominadas arestas. Uma árvore de busca é um grafo orientado, constituída por nós e arcos, na qual cada nó representa um estado do problema, e cada arco representa como se relacionam os estados referentes aos nós interligados pelos arcos (KAGAN, 2009). Na Figura 3.1 é ilustrado o comportamento de uma árvore de busca.

Figura 3.1 – Árvore de busca



Fonte: Adaptado de Kagan (2009)

Conforme a quantidade de equipamentos de proteção e manobra a serem instalados, e considerando-se que todos os trechos são possíveis candidatos para alocação de dispositivos de proteção e manobra, a quantidade de soluções torna-se 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 (KAGAN, 2009).

Existem diversas técnicas de busca utilizando a metodologia heurística aplicada a sistemas elétricos de potência com o objetivo de otimizar pontos de instalação de

equipamentos de proteção na rede de média tensão. Algumas dessas técnicas são descritas a seguir para melhor conhecimento e explicação da escolha do método de busca utilizado.

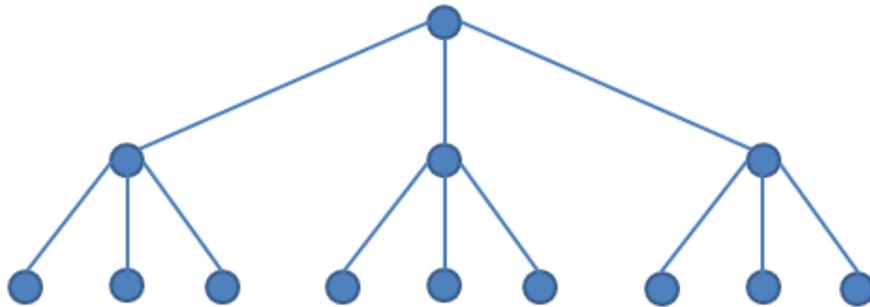
3.1.1 Técnicas de busca heurística

Os principais métodos de busca utilizados em metodologia heurística para otimização de problemas são: Busca em amplitude, busca em profundidade, busca em gradiente, busca pela melhor escolha.

3.1.1.1 Busca em amplitude

A busca em amplitude é uma das técnicas mais simples de problemas de busca. Consiste em gerar a partir de um ponto inicial, todos os possíveis nós sucessores percorrendo todos os caminhos da árvore até encontrar o ponto final que será a solução do problema. Este método possui a desvantagem de gerar um número muito grande de níveis em uma árvore podendo retardar o processo de busca. O método de busca em amplitude está representado na Figura 3.2.

Figura 3.2 – Método de busca em amplitude



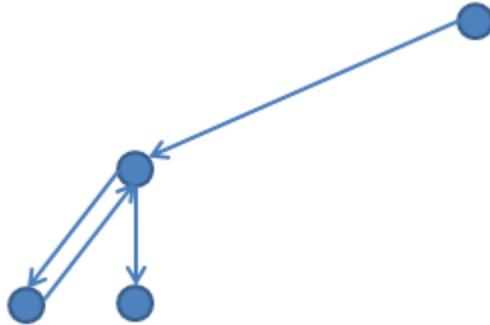
Fonte: Própria

3.1.1.2 Busca em profundidade

Diferentemente do método de busca em amplitude, a busca por profundidade percorre um único caminho a partir do nó de partida, interrompendo a interação no ponto quando o caminho alcança o nó terminal, que não possui sucessores ou quando se alcança um nó com pior estado que o caminho anterior. Segundo Kagan (2009) em qualquer destes casos, um procedimento de retrocesso (*backtrack*) é realizado, retornando-se ao nó imediatamente

anterior para a geração de um outro caminho. Na Figura 3.3 é ilustrado o procedimento de busca em profundidade.

Figura 3.3 – Método de busca em profundidade

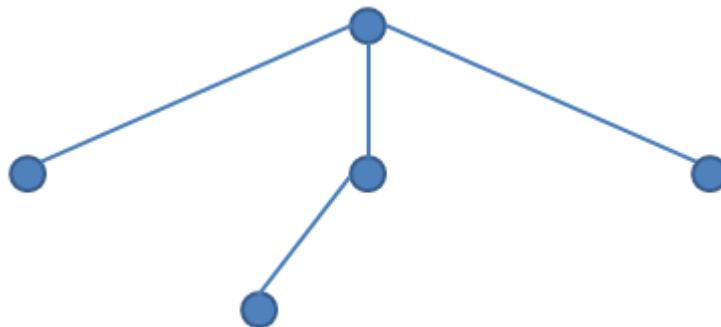


Fonte: Própria

3.1.1.3 Busca em gradiente

A busca em gradiente é realizada partindo de um nó raiz, onde em cada nível da árvore, todos os possíveis nós sucessores serão analisados, e apenas o que apresentar melhor solução, será expandido para os demais níveis, até atingir o fim do caminho. Na Figura 3.4 é mostrado o método de busca em gradiente.

Figura 3.4 – Método de busca em gradiente



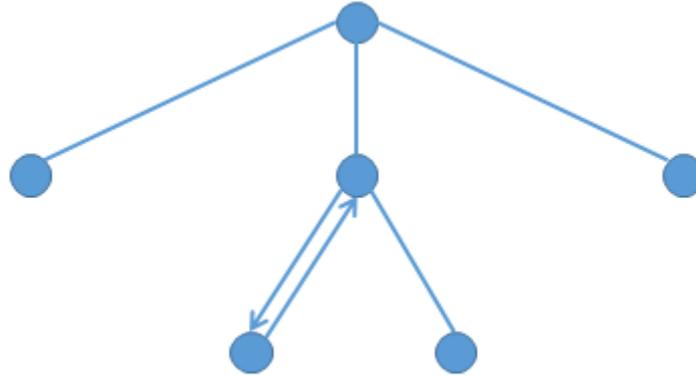
Fonte: Própria

3.1.1.3 Busca pela melhor escolha

Este método é uma junção da busca em amplitude e da busca em profundidade. Partindo do conceito do método de busca em amplitude, todos os possíveis nós de um determinado nível são analisados, mas apenas o nó com melhor potencial é expandido. Caso o nó terminal do caminho não otimize o sistema, ocorre o processo de *backtrack* para encontrar

uma melhor escolha para o problema, de acordo com o conceito de busca em profundidade. Desta forma, para cada nível, todos os nós serão avaliados, porém apenas o nó com melhor resposta para o problema será expandido para a continuação do caminho. Na Figura 3.5 o método de busca pela melhor escolha é ilustrado.

Figura 3.5 – Método de busca pela melhor escolha



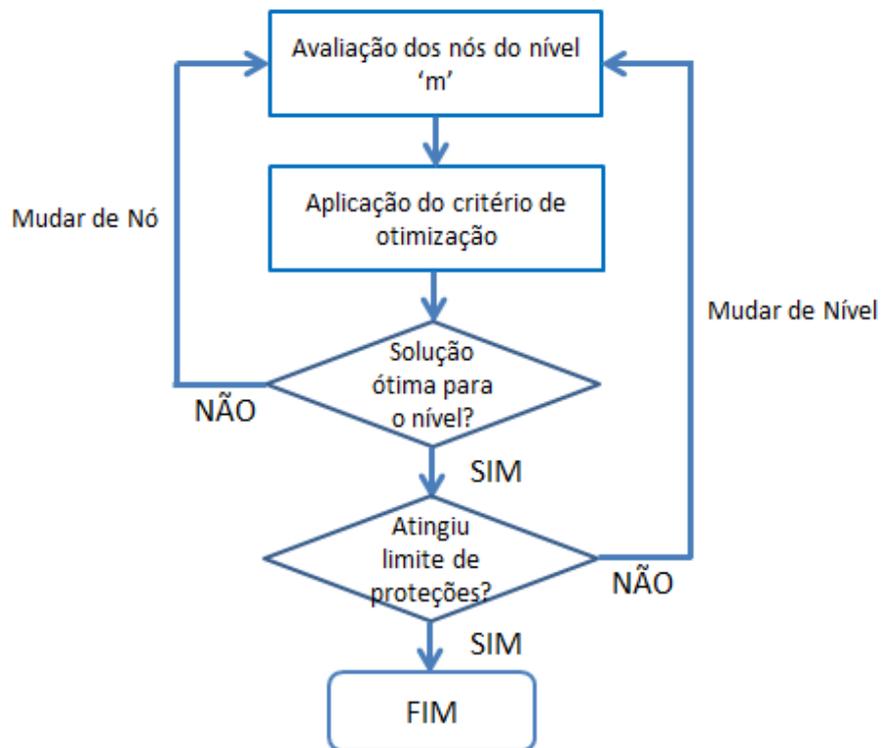
Fonte: Própria

3.1.2 Escolha de utilização do método de busca em profundidade

Segundo Kagan (2009) a busca em árvore de profundidade é a metodologia heurística que melhor atende a necessidade de encontrar a solução de alocação dos equipamentos de proteção e manobra mais adequada, de forma a diminuir o tempo computacional. A propriedade de *backtrack* é fundamental para a decisão de escolha dos pontos de alocação de modo otimizado e objetivo.

O método de busca em profundidade analisa todos os n possíveis pontos de alocação de DPM do alimentador, escolhendo a melhor solução por meio de um critério pré-estabelecido, em que para o próximo nível são analisados $n-1$ possibilidades, e assim segue até que o limite de p proteções tenha sido alcançado. Na Figura 3.6 é apresentado o fluxograma da metodologia de busca em profundidade.

Figura 3.6 – Fluxograma para a metodologia heurística adotada



Fonte: Própria

3.2 Critério de desempenho máximo de um alimentador

Nos tópicos anteriores as metodologias heurísticas foram apresentadas e escolhida a mais adequada para o problema proposto. Porém, para que o método de alocação eficiente dos dispositivos seja implementado, a escolha do nó mais adequado para cada nível da árvore estudada deve ser realizada. Por essa razão é necessário definir um critério para a determinação do nó mais adequado. Este critério é denominado como desempenho máximo de um alimentador (DMA).

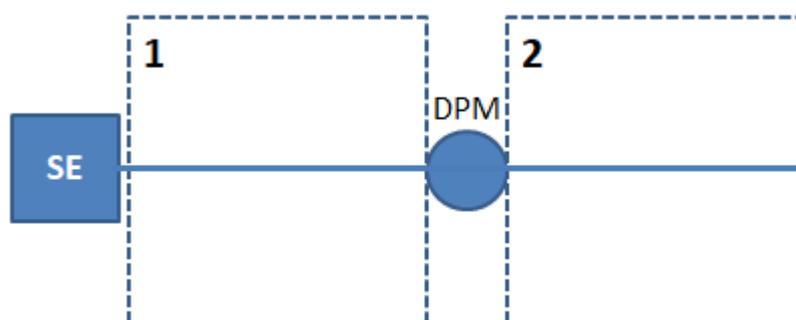
O critério de DMA foi desenvolvido em (MAIA, 2015), visando a realocação dos DPM para pontos onde o indicador FEC seria otimizado. Segundo Maia (2015) o DMA é um conceito associado a uma configuração de DPMs, definida pela quantidade e alocação de cada DPM no alimentador, que resulta no melhor índice de interrupção de clientes.

Um alimentador que não possui nenhuma proteção ao longo de toda a sua extensão permite que na ocorrência de uma falta em qualquer trecho da rede provoque a falta de energia elétrica em todos os clientes atendidos por este alimentador.

A instalação de um equipamento de proteção em um determinado ponto do alimentador proporciona a redução do número de clientes afetados por uma falta.

Na Figura 3.7 é apresentado um alimentador com a presença de um DPM, e a identificação de duas zonas, 1 e 2. Com a instalação do equipamento de proteção, caso uma falta ocorra em um ponto qualquer à jusante do DPM, zona 2, os clientes à montante do dispositivo, zona 1, não são afetados pois o DPM secciona a zona afetada para minimizar a quantidade de clientes sem fornecimento de energia elétrica.

Figura 3.7 – Alimentador exemplo para um dispositivo de proteção



Fonte: Própria

Para a aplicação da metodologia do DMA devem ser considerados alguns critérios em relação aos pontos de alocação e a quantidade de DPM, como:

- Inicialmente, o alimentador não deve possuir nenhum equipamento de proteção e manobra em toda sua extensão;

- Os pontos para alocação dos DPM são pré-definidos pelo projetista. Estes pontos serão: postes, estruturas que abrigam transformadores, estruturas que abrigam chaves fusíveis, estruturas que abrigam chaves seccionadoras, etc. Esta consideração será feita a partir do critério do projetista e o comportamento do alimentador em relação às faltas;

- Para a determinação do ponto de alocação de um DPM_i deve ser considerado no cálculo o ponto de instalação do DPM_{i-1} já instalado, não podendo haver mudança de localização dos equipamentos já alocados;

A partir do método heurístico de busca em profundidade, é possível determinar todos os pontos de instalação dos equipamentos de proteção e manobra reduzindo o número de clientes afetados por uma falta e por consequência o valor do FEC. Segundo Maia (2015) o desempenho do alimentador (DMA), para uma determinada quantidade de DPM, está associado à configuração desses DPMs, que resulta na máxima continuidade de fornecimento de energia que representa o menor risco de interrupção do serviço aos clientes, provocado por faltas.

O cálculo do valor do DMA é realizado através da expressão (3):

$$DMA = C_m \cdot L_j \quad (3)$$

Em que:

- C_m : somatório dos clientes afetados à montante do DPM.
- L_j : somatório do comprimento do alimentador à jusante do DPM.

Para aplicar a metodologia do DMA devem ser consideradas três variáveis na análise do ponto estudado para instalação do DPM:

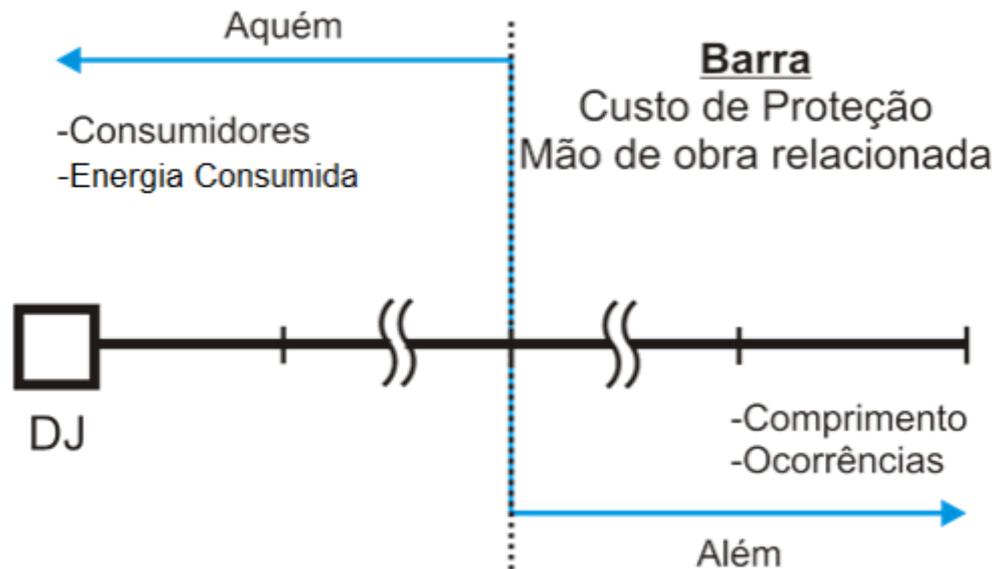
- O ponto em que o DPM é instalado. Esta variável é importante ser considerada, pois possui fator de impacto sobre o custo de instalação do equipamento. Para esta variável deve ser levado em consideração se o ponto apresenta problemas futuros, evitando assim realocação ou remoção do dispositivo, ou se o local do equipamento previsto no projeto está inserido em propriedades particulares;

- A segunda variável leva em consideração os clientes à montante do DPM. O impacto desta variável para a otimização dos pontos de alocação dos equipamentos consiste na quantidade de clientes protegidos. Desta forma, quanto maior o número de clientes à montante do DPM, maior o número de clientes protegidos por este equipamento;

- A terceira variável considera que o dispositivo de proteção deve detectar o maior número de faltas possíveis no trecho protegido. Para esta variável podem ser considerados tanto a quantidade de faltas que existem no trecho protegido pelo DPM, quanto o comprimento do alimentador à jusante do dispositivo.

A consideração de clientes à jusante e distância à montante do ponto de instalação do equipamento para a realização do cálculo do DMA é realizada para que o equipamento possa proteger o maior número de clientes possível e seja capaz de detectar faltas por uma maior extensão do alimentador. Segundo Maia (2015) pode-se aumentar a quantidade de variáveis em estudo, tanto a montante, quanto a jusante, substituindo-se o comprimento pelas ocorrências ou os consumidores pelo consumo de energia. Na Figura 3.8 são apresentadas as variáveis que podem ser utilizadas para a aplicação do método, as quais podem levar em consideração a energia consumida ao invés da quantidade de consumidores, assim como faltas na rede aérea de MT ao invés do comprimento do trecho protegido pelo equipamento.

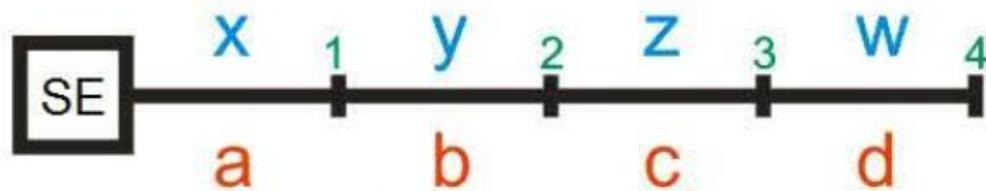
Figura 3.8 – Variáveis passíveis de implementação do DMA



Fonte: (MAIA, 2015)

Na Figura 3.9 é ilustrado o conceito de DMA. Os pontos 1, 2 e 3 são os possíveis pontos para alocação de DPM. As variáveis x , y , z e w , correspondem aos valores dos comprimentos dos trechos entre as barras, enquanto as variáveis a , b , c e d , correspondem a quantidade de clientes existentes em cada trecho.

Figura 3.9 – Rede simplificada para ilustração do DMA



Fonte: (MAIA, 2015)

Com o alimentador sem nenhuma proteção contra sobrecorrentes, para qualquer falta que ocorra em toda a extensão da rede de distribuição, todos os clientes atendidos são afetados. Já com a alocação de um dispositivo de proteção, ocorrerá uma redução de clientes afetados por uma falta, melhor detalhada na Tabela 3.1.

O objetivo do critério de DMA é o de maximizar a probabilidade de proteção dos clientes. Portanto, para a alocação de um dispositivo na barra 1, por exemplo, é considerada a quantidade de clientes à montante do ponto analisado, neste caso a 'a' clientes, e a extensão à jusante da barra, $y+z+w$ quilômetros. Para o DPM alocado nesta barra, caso ocorram faltas em todo o trecho à jusante de 1, os clientes existentes em 'a' estão protegidos e portanto não serão afetados. Porém, os clientes à jusante da barra são afetados pela sobrecorrente e ficam sem fornecimento de energia elétrica.

Tabela 3.1 – Consumidores afetados pelo defeito em cada trecho

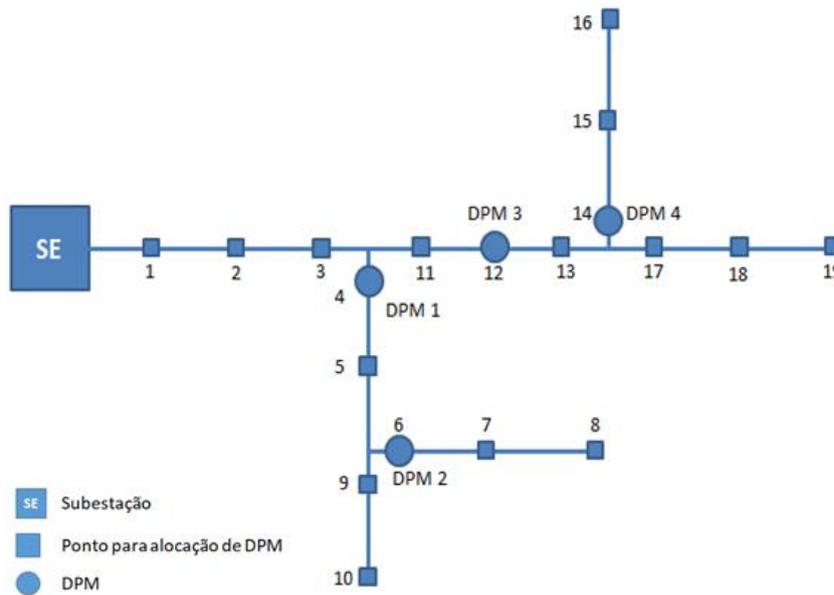
Local de Instalação	Trecho do defeito				Clientes protegidos	Probabilidade (DMA)
	a	b	b	d		
1	0	x	x	x	x	$x*(b+c+d)$
2	0	0	(x+y)	(x+y)	(x+y)	$(c+d)*(x+y)$
3	0	0	0	(x+y+z)	(x+y+z)	$d*(x+y+z)$

Fonte: MAIA (2013)

Desta forma, todos os pontos do alimentador serão analisados, em que o ponto que alcançar o maior valor dentre os DMA, é considerada a localização mais eficiente de alocação do DPM, pois protegerá o maior número de clientes e detecta faltas em um trecho mais longo do alimentador. Para encontrar o desempenho total do alimentador, basta somar todos os valores de DMA encontrados para os n DPM alocados e dividir pelo produto de clientes total e distância total do alimentador.

Na Figura 3.10 é apresentado um exemplo de um alimentador, com 4 dispositivos de proteção já instalados em sua extensão. A ideia é a de calcular valores ótimos para realocar estes equipamentos para pontos que protejam o maior número de clientes e detectem faltas em um trecho mais longo do alimentador.

Figura 3.10 – Rede exemplo com a disposição atual dos DPM



Fonte: Própria

A Tabela 3.2 mostra as quantidades de clientes e os valores dos comprimentos de cada trecho do alimentador.

Tabela 3.2 – Consumidores e distância entre os trechos à montante do ponto em análise

	Clientes	Distância
Ponto 1	8	85
Ponto 2	5	29
Ponto 3	4	45
Ponto 4	0	0
Ponto 5	10	69
Ponto 6	0	0
Ponto 7	8	86
Ponto 8	6	93
Ponto 9	5	50
Ponto 10	6	65
Ponto 11	4	43
Ponto 12	2	43
Ponto 13	3	10
Ponto 14	0	0
Ponto 15	10	100
Ponto 16	7	79
Ponto 17	4	55
Ponto 18	2	20
Ponto 19	1	13

Fonte: Própria

Para comparar a disposição atual dos equipamentos com as disposições sugeridas pelo método de DMA, é necessário calcular o DMA total para o alimentador nos dois casos. O caso atual resulta em um DMA real, e o caso proposto resulta em um DMA ideal. Desta forma, para o caso atual, tem-se que:

$$DMA_{real} = 50 \cdot 363 + 21 \cdot 179 + 58 \cdot 277 + 10 \cdot 179 = 39.765 \quad (4)$$

$$C_{TOTAL} \times D_{TOTAL} = 85 \cdot 885 = 75.225 \quad (5)$$

$$DMA_{real} = \frac{39.765}{75.225} = 0,5286 \quad (6)$$

Para o caso sugerido, é preciso analisar o alimentador através do método de busca em árvore de profundidade para escolher os quatro melhores pontos de alocação dos dispositivos. A seguir serão realizados os cálculos para definir os pontos ótimos de alocação dos equipamentos de proteção e manobra.

- Cálculo do DMA para alocação do primeiro equipamento

Para a alocação do primeiro equipamento, o alimentador será analisado sem nenhuma proteção e desta forma, serão analisados todos os pontos existentes na rede de distribuição e calculados os DMA dos respectivos pontos. Os resultados dos cálculos estão dispostos na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Cálculo do DMA para alocação do DPM1

	Clientes a Montante	Distância a Jusante	DMA
Ponto 1	8	800	6400
Ponto 2	13	771	10023
Ponto 3	17	726	12342
Ponto 4	50	363	18150
Ponto 5	40	294	11760
Ponto 6	71	179	12709
Ponto 7	79	93	7347
Ponto 9	79	65	5135
Ponto 11	56	353	19768
Ponto 12	54	310	16740
Ponto 13	51	267	13617
Ponto 14	68	179	12172
Ponto 15	78	79	6162
Ponto 17	82	33	2706
Ponto 18	84	13	1092

Fonte: Própria

A partir desta análise pode-se perceber que o maior valor de DMA dentre os pontos analisados é o ponto 11 e portanto, é realizado neste ponto a alocação do primeiro dispositivo de proteção.

- Cálculo do DMA para alocação DPM2

Para o cálculo do segundo DPM, considera-se que já existe um equipamento no ponto 11. Desta forma, o alimentador será seccionado neste ponto, uma vez que este equipamento já é responsável pela proteção dos clientes à montante. Para essa condição, ao realizar os cálculos do DMA em cada ponto da rede foram obtidos os resultados mostrados na Tabela 3.4

Tabela 3.4 – Cálculo do DMA para alocação do DPM2

	Clientes a Montante	Distância a Jusante	DMA
Ponto 1	8	532	4256
Ponto 2	13	503	6539
Ponto 3	17	458	7786
Ponto 4	21	363	7623
Ponto 5	31	294	9114
Ponto 6	42	179	7518
Ponto 7	50	93	4650
Ponto 9	50	65	3250
Ponto 12	2	310	620
Ponto 13	5	267	1335
Ponto 14	39	179	6981
Ponto 15	49	79	3871
Ponto 17	53	33	1749
Ponto 18	55	13	715

Fonte: Própria

Conforme mostrado na Tabela 3.4, através dos cálculos realizados, determina-se que a alocação do segundo dispositivo de proteção e manobra será no ponto 5.

- Cálculo do DMA para alocação do DPM3

Na análise do alimentador para o terceiro equipamento de proteção e manobra consideram-se os dois DPMs já instalados nos pontos 11 e 5. Os resultados obtidos estão dispostos na Tabela 3.5

Tabela 3.5 – Cálculo do DMA para alocação do DPM3

	Clientes a Montante	Distância a Jusante	DMA
Ponto 1	8	153	1224
Ponto 2	13	124	1612
Ponto 3	17	79	1343
Ponto 4	21	69	1449
Ponto 6	11	179	1969
Ponto 7	19	93	1767
Ponto 9	19	65	1235
Ponto 12	2	310	620
Ponto 13	5	267	1335
Ponto 14	39	179	6981
Ponto 15	49	79	3871
Ponto 17	53	33	1749
Ponto 18	55	13	715

Fonte: Própria

Para alocação do terceiro equipamento, o comportamento do alimentador resulta em um maior DMA no mesmo ponto onde o DPM4 estava alocado na situação real, portanto, o ponto escolhido para alocação do terceiro equipamento de proteção será no ponto 14.

- Cálculo do DMA para alocação do DPM4

Para a alocação do último equipamento de proteção serão considerados os dispositivos já instalados nos pontos 11, 5 e 14. Após a realização dos cálculos de DMA para cada ponto, foram obtidos os resultados expostos na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Cálculo do DMA para alocação do DPM3

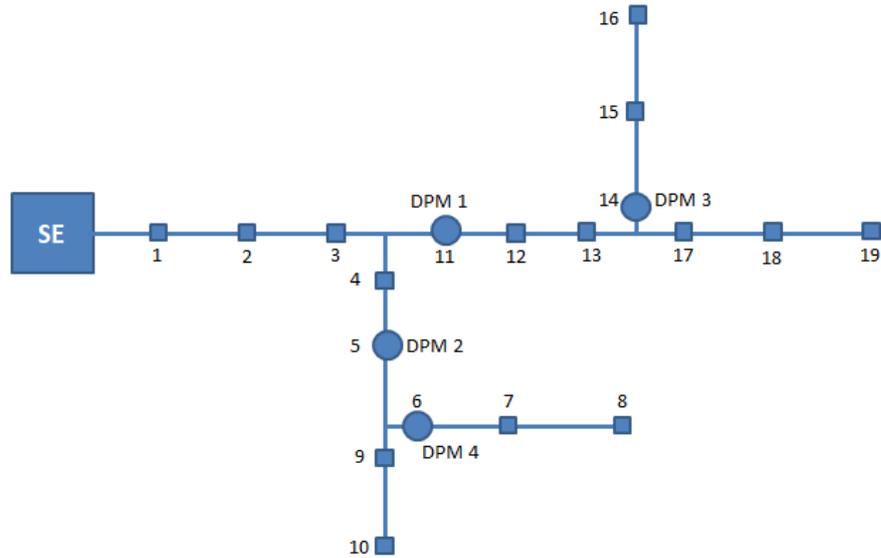
	Clientes a Montante	Distância a Jusante	DMA
Ponto 1	8	153	1224
Ponto 2	13	124	1612
Ponto 3	17	79	1343
Ponto 4	21	69	1449
Ponto 6	11	179	1969
Ponto 7	19	93	1767
Ponto 9	19	65	1235
Ponto 12	2	131	262
Ponto 13	5	88	440
Ponto 15	10	79	790
Ponto 17	9	33	297
Ponto 18	11	13	143

Fonte: Própria

Os resultados obtidos apontam para a alocação do próximo equipamento no ponto onde estava alocado o DPM 2 na situação real do alimentador, o ponto 6.

Portanto, a nova disposição dos equipamentos encontra-se ilustrada na Figura 3.11, em que houve a realocação de dois DPMs para pontos mais eficientes visando a proteção máxima de clientes por zona protegida.

Figura 3.11 – Rede exemplo com a disposição ideal dos DPM



Fonte: Própria

A partir dos dados da Tabela 3.2, pode-se obter as quantidades de clientes à montante e extensão do alimentador à jusante de cada dispositivo de proteção instalado e desta forma encontrar o valor do DMA total ideal para este alimentador, semelhante ao realizado na Equação (4).

$$DMA_{ideal} = 56 \cdot 320 + 60 \cdot 294 + 68 \cdot 179 + 71 \cdot 179 = 60.441 \quad (7)$$

$$DMA_{ideal} = \frac{60.441}{75.225} = 0,8035 \quad (8)$$

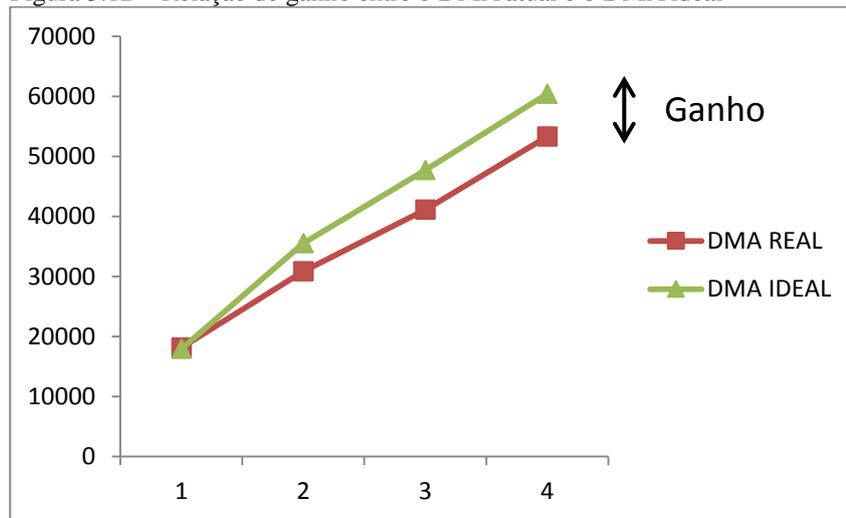
Portanto, a partir do resultado obtido em (5) e em (8), é possível calcular o valor do ganho do alimentador em relação à disposição real dos dispositivos de proteção e manobra comparado à disposição ideal, calculada utilizando o critério de DMA.

$$Ganho = 0,8035 - 0,7085 = 0,095 \quad (9)$$

Desta forma, para obter uma disposição ótima dos equipamentos existentes no alimentador fictício apresentado, é necessário realocar dois dispositivos de proteção, resultando em um ganho de aproximadamente 9,15 % para a concessionária do DMA ideal em relação ao DMA real.

Na Figura 3.12 é ilustrada a relação entre o número de equipamentos de proteção de uma rede de distribuição e o valor do DMA obtido para cada n alocações. Desta forma, é possível visualizar o comparativo entre a relação de proteções e DMA na disposição atual e a disposição proposta pelo método.

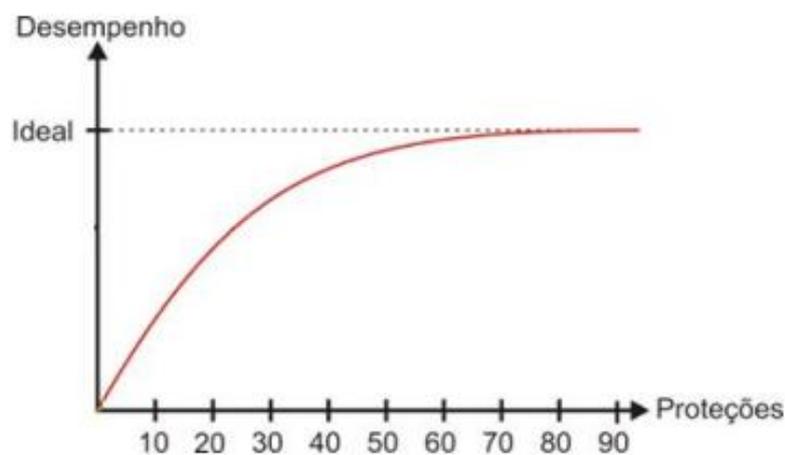
Figura 3.12 – Relação de ganho entre o DMA atual e o DMA ideal



Fonte: Própria

A curva número de proteções por valor de DMA deve comportar-se como uma assíntota tendendo a um valor ideal, pois a medida que são alocados novos dispositivos, o desempenho máximo do alimentador de cada equipamento tende a diminuir, enquanto o valor do DMA total tende a aumentar de forma acumulada. Este comportamento é melhor observado para uma grande quantidade de equipamentos de proteção alocados em um alimentador, conforme ilustrado na Figura 3.13. A medida que a quantidade de equipamentos aumenta, o valor de DMA tende a se tornar equilibrado.

Figura 3.13– Curva característica para o desempenho máximo do alimentador



Fonte: MAIA (2013)

3.3 Considerações do capítulo

Neste capítulo foram apresentadas as fundamentações teóricas utilizadas como base para o desenvolvimento do algoritmo de posicionamento eficiente dos dispositivos de proteção e equipamentos de manobra, metodologia heurística de busca em profundidade e

critério de desempenho máximo de um alimentador. No próximo capítulo será mostrado o desenvolvimento do algoritmo, utilizando as metodologias discutidas neste capítulo.

4 DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO PARA CÁLCULO DO DESEMPENHO MÁXIMO DE UM ALIMENTADOR

Para o desenvolvimento do algoritmo optou-se pela utilização da linguagem de programação Python, devido a este ser um software livre, de sintaxe simples, multiplataforma e com recursos para realização de cálculos numéricos, além de possuir os atributos citados anteriormente, conta com uma biblioteca voltada para o estudo de redes elétricas de distribuição, chamada MyGrid. A seguir, será apresentada a biblioteca MyGrid e sua aplicação na implementação do código de eficientização dos pontos de instalação dos dispositivos de proteção e manobra (DPM).

4.1 MyGrid

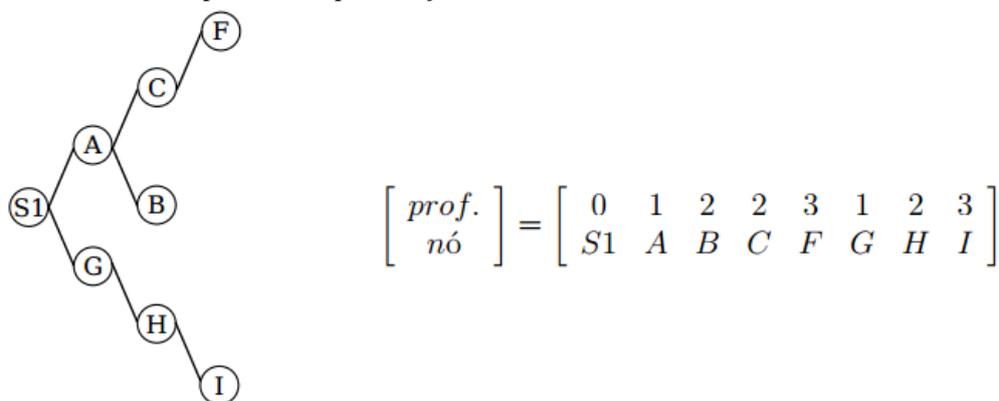
O MyGrid é uma biblioteca desenvolvida pelo Grupo de Redes Elétricas Inteligentes (GREI) da Universidade Federal do Ceará para a representação da rede elétrica de distribuição baseada na teoria de grafos em representação nó-profundidade (RPN). O GREI é um laboratório de pesquisas e desenvolvimento de soluções voltada à redes inteligentes.

4.1.1 Representação nó-profundidade (RNP)

A teoria de grafos é um ramo da matemática que relaciona objetos por meio de arestas e vértices, em que as arestas são representadas por arcos que conectam os vértices, enquanto os vértices são representados geralmente por círculos. A representação nó-profundidade é uma forma de configuração de uma rede elétrica e “[...] consiste em uma lista linear, contendo os nós da árvore e suas respectivas profundidades, formando pares do tipo $(n_x; p_x)$, sendo n_x o nó da árvore e p_x a profundidade do nó” (Melo, 2015). Segundo Marques (2013) profundidade de um nó em uma árvore é o número de arestas do caminho formado entre este nó e o nó raiz.

Computacionalmente a lista contendo os pares $(n_x; p_x)$ é representada por uma matriz de dimensão $2 \times n$ (Melo, 2015). Desta forma, a representação nó-profundidade utiliza-se da metodologia heurística de busca em profundidade para análise dos nós de um grafo, conhecendo a profundidade do nó. A biblioteca MyGrid representa uma árvore de grafo conforme a Figura 4.1, em que também é mostrada a representação matricial desta árvore.

Figura 4.1 – Grafo simples e sua representação matricial em RNP



Fonte: MELO (2015)

4.1.2 Módulos de atuação da biblioteca MyGrid

A biblioteca MyGrid possui dois módulos principais, conforme (MELO,2015):

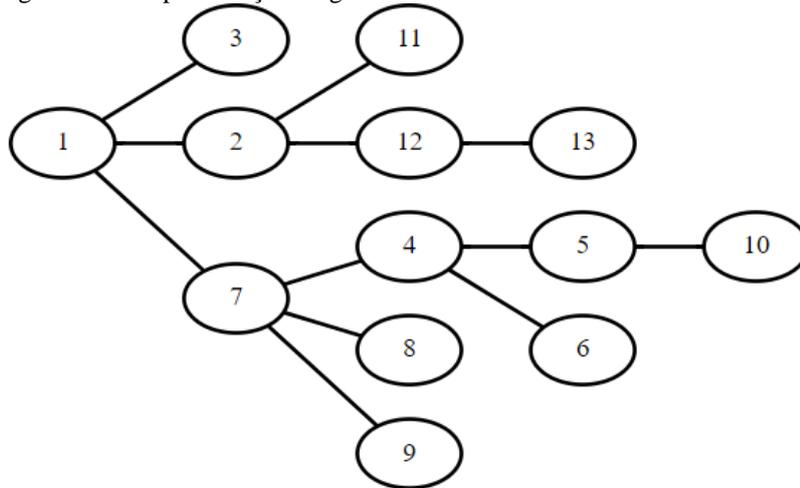
- Módulo RNP, que contém classes que fornecem as funcionalidades para a representação de grafos conforme a teoria de RNP; e
- Módulo Rede, que contém classes que fornecem as funcionalidades para a representação da rede elétrica, sob o ponto de vista de RNP de alimentador e RNP de setor.

Segundo Melo (2015) para representar um sistema de distribuição radial, define-se a RNP de alimentador de forma que:

- Alimentadores são considerados árvores;
- Setores são considerados nós;
- Chaves são consideradas arestas;
- As barras das subestações são consideradas os nós raízes das árvores.

No módulo RNP, as árvores de grafo são representadas por meio de dicionários em que as chaves são os nós do grafo e os valores de cada chave são os nós vizinhos. Com isto, deve-se realizar a ordenação da árvore, para que o programa conheça o nó equivalente ao ponto inicial da rede. A representação nó-profundidade de grafo de uma rede fictícia é mostrada conforme na Figura 4.2, em que o nó 1 refere-se ao nó inicial da rede.

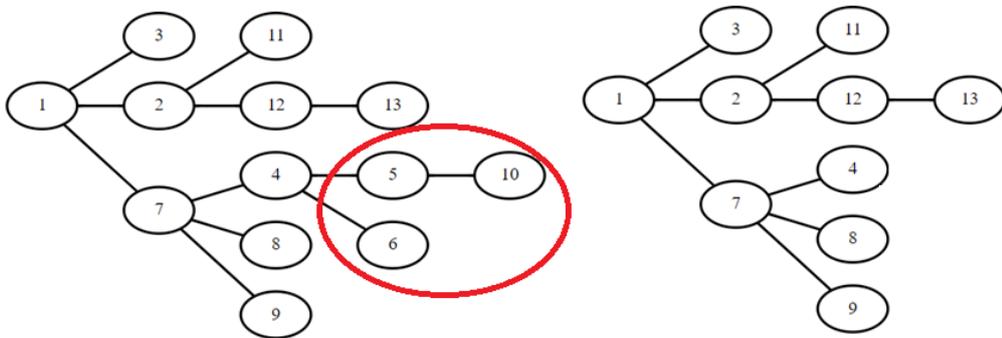
Figura 4.2 – Representação do grafo em RNP



Fonte: MELO (2015)

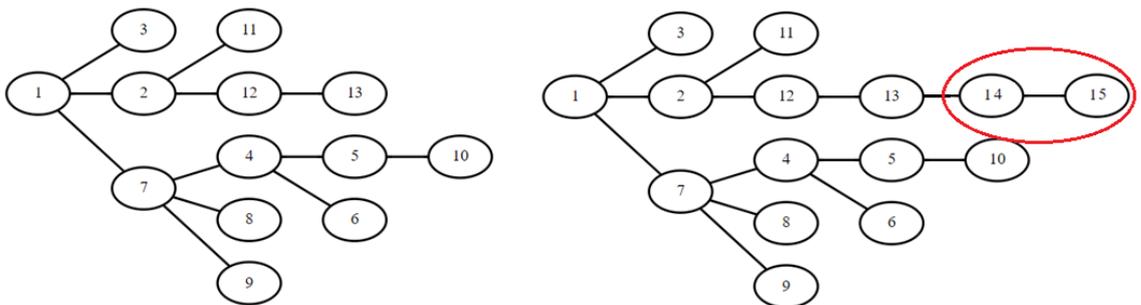
Uma das principais funcionalidades disponibilizadas pelo MyGrid são as operações de poda e inserção. A operação de poda, ilustrada na Figura 4.3, tem por objetivo podar a rede em um determinado ponto, permanecendo apenas a parte à montante do ponto podado. A operação de inserção, ilustrada na Figura 4.4, insere elementos na rede, em que haverá um aumento de elementos à jusante do ponto de inserção.

Figura 4.3 – Operação de poda na representação da Figura 4.2



Fonte: Adaptado de MELO (2015)

Figura 4.4 – Operação de inserção na representação da Figura 4.2



Fonte: Adaptado de MELO (2015)

Utilizando os conceitos de teoria dos grafos em associação com o conceito de RNP é possível ter uma representação fiel da rede elétrica, sendo a RNP de alimentador utilizada para representar computacionalmente a topologia da rede de maneira macro (MELO, 2015).

4.2 Desenvolvimento do algoritmo de eficientização da localização dos DPM

Neste tópico será apresentada uma visão geral do algoritmo desenvolvido para posicionamento eficiente dos pontos de instalação dos equipamentos de proteção, descrevendo suas principais funções.

4.2.1 Base de dados

Inicialmente foi necessária estruturar uma base de dados que contemplasse todas as informações necessárias para execução do cálculo do DMA utilizado na biblioteca MyGrid. Deste modo, foram definidos os nós como os possíveis pontos de alocação dos equipamentos de proteção e manobra, e as profundidades como o número de arestas entre o nó atual e o nó raiz. Determinados os nós e suas respectivas profundidades, foram colhidas as informações de número de clientes e distâncias entre cada dois possíveis pontos de alocação, que seriam associadas ao nó imediatamente à jusante da informação coletada.

Esta base de informações foi extraída do banco de dados da concessionária através de uma planilha no software Excel que pode ser lida através de uma das bibliotecas Python.

Dentro da base de dados, deve haver também a disposição dos nós em relação aos seus vizinhos. Por exemplo, na representação de grafo da Figura 4.2, a base de dados neste caso deve detalhar cada vizinho de um determinado nó, conforme mostrado na Tabela 4.1, de modo que esta informação permita a representação nó-profundidade do alimentador.

Tabela 4.1 – Representação de vizinhos na base de dados

NÓ	VIZINHO 1	VIZINHO 2	VIZINHO 3
0	1		
1	0	2	
2	1	3	
3	2	4	
4	3	5	7
5	4		

Fonte: Própria

Para o alimentador PCJ01P4 utilizado para o estudo, a representação nó-profundidade obtida é apresentada no Apêndice C. O carregamento das informações contidas na base de dados em arquivo Excel, é obtido pelo algoritmo 4.1. Os dados são carregados através da planilha em Excel denominada ‘PCJ01P4’, detalhada no Apêndice A, e armazenados nas variáveis ‘r’ e ‘d’. O comando *rede* pertence à biblioteca MyGrid e é utilizado para atribuição de valores referente à metodologia de nó-profundidade.

Algoritmo 4.1 – Definição da topologia da rede

```
dados = carregar_dados('PCJ01P4.xlsx')
r = dict()
d = dict()
for i in dados:
    r[i['nome']] = i['vizinhos']
    d[i['nome']] = [int(i['clientes']), float(i['distancia'])]
rede = Arvore(r, dtype=str)
rede.ordenar(raiz='0')
```

Fonte: Própria

4.2.2 Cálculo da quantidade total de clientes e comprimento total do alimentador

O cálculo do número total de clientes e do comprimento total do alimentador é realizado utilizando o Algoritmo 4.2. O comando *sum* é responsável pela soma entre os valores de consumidores e distância definidos na diretiva ‘dados’.

Algoritmo 4.2 – Cálculo do total de clientes e comprimento total do alimentador

```
total_consumidores = sum([i[0] for i in d.values()])
total_distancia = sum([i[1] for i in d.values()])
```

Fonte: Própria

4.2.3 Definição do número de equipamentos a serem projetados

A definição do número de equipamentos a serem implantados está mostrada no Algoritmo 4.3. Nesta etapa do processo, o número de proteções é definido pelo usuário em *nprotec*, conforme apresentado. O termo *pontos_de_alocação* é utilizado para armazenar os nós indicados para cada proteção definida.

Algoritmo 4.3 – Definição do número de equipamentos a serem projetados

```
nprotec = 6
pontos_de_alocacao = list()
```

Fonte: Própria

4.2.4 Definição dos nós à jusante com equipamentos alocados

Na medida que os equipamentos são alocados na variável *pontos_de_alocacao*, é necessário que o algoritmo detecte os dispositivos alocados em cada novo cálculo de DMA. Para isto, fez-se necessário o desenvolvimento de um algoritmo que identificasse os pontos em que já existem equipamentos alocados à jusante do ponto em estudo.

O Algoritmo 4.4 determina os nós em que existem DPM através de iterações, e alocando estes nós na variável *nos_jusante*.

Algoritmo 4.4 – Definição de nós a jusante

```
def encontrar_nos_jusante(rede, no):
    vizinhos = rede.arvore[no]
    rnp_dict = rede.rnp_dic()
    prof_no = int(rnp_dict[no])
    nos_jusante = list()
    for i in vizinhos:
        prof_vizinho = int(rnp_dict[i])
        if prof_vizinho > prof_no:
            nos_jusante.append(i)
    return nos_jusante
```

Fonte: Própria

4.2.5 Realização de poda

Para a realização do cálculo do DMA, é necessário que a árvore seja podada nos pontos onde se encontram os equipamentos de proteção e manobra, pois conforme visto no Capítulo 3, a inserção de um novo equipamento no sistema implica na mudança da análise dos pontos de instalação em relação ao DMA para o próximo DPM a ser instalado. Devido a isto, é necessário que o algoritmo realize a poda da árvore para cada novo ponto proposto para alocação do equipamento.

O processo de poda da rede é realizado através do Algoritmo 4.5, que inicialmente itera *k* vezes sobre a árvore, onde *k* é a quantidade de equipamentos apontados pelo algoritmo. Posteriormente, ocorre uma nova iteração de modo a transpor a matriz definida no Algoritmo 4.1 de modo que a matriz torne-se $n \times 2$.

Algoritmo 4.5 – Realização de poda

```
for k in range(nprotec):
    print '-----\nAlocacao do dispositivo {k}\n-----'.format(k=k)
    dma = list()
    for i in np.transpose(rede.rnp[:, 1:]):
        no = i[1]
        prof = i[0]
```

```

r = deepcopy(rede)
cam_min = len(rede.rnp_dic())
no_min = '0'

```

Fonte: Própria

Para a realização da poda é necessário o conhecimento dos valores de profundidade da rede, pois a árvore será podada no trecho que possuir a profundidade menor que o ponto que alocar o equipamento. Porém, visto que a árvore possui diversos pontos com a mesma profundidade, é necessário a utilização das variáveis *caminho1*, *caminho2* e *caminho3* para que apenas as profundidades analisadas sejam àquelas pertencentes ao caminho nó para a raiz. No Algoritmo 4.6 é encontrado o procedimento para realização da poda da árvore.

Algoritmo 4.6 – Percorrer os nós que possuem proteção associada

```

for l in pontos_de_alocacao:
    prof = int(rede.rnp_dic()[l])
    prof_ = int(rede.rnp_dic()[no])
    caminho1 = rede.caminho_no_para_raiz(l)
    caminho2 = rede.caminho_no_para_raiz(no)
    caminho3 = rede.caminho_no_para_no(no, l)
    if prof > prof_ and no in caminho1[1, :]:
        nos_jusante = encontrar_nos_jusante(rede, l)
        for u in nos_jusante:
            try:
                r.podar(u, alterar_rnp=True)
            except Exception as e:
                pass
    elif prof < prof_ and l in caminho2[1, :] and cam_min >
np.shape(caminho3)[1]:
        cam_min = prof
        no_min = l

```

Fonte: Própria

4.2.6 Cálculo do DMA

Para o cálculo do DMA é necessário determinar os valores de quantidade de clientes à montante e distância total à jusante do ponto de instalação do DPM.

O cálculo para determinar a quantidade de consumidores à montante de um determinado nó é realizado através do Algoritmo 4.7. Inicialmente há uma verificação dos pontos que já possuem equipamentos alocados, utilizando o Algoritmo 4.4 de modo a podar a árvore caso a condição seja satisfeita. Posteriormente, há uma iteração sobre a rede, armazenando o número de clientes na variável *consumidores*.

Algoritmo 4.7 – Cálculo do número de consumidores à montante de um nó até a proteção mais próxima

```

r2 = deepcopy(rede)
nos_jusante = encontrar_nos_jusante(rede, no)
for u in nos_jusante:
    r2.podar(u, alterar_rnp=True)
poda = r2.podar(no_min, alterar_rnp=True)
consumidores = 0
rnp = poda[0]
for l in np.transpose(rnp):
    prof_, no_ = l
    if no_ != no_min:
        c, dt = d[no_]
        consumidores += c

```

Fonte: Própria

Para a realização do cálculo da distância total à montante do nó estudado, foi utilizada a RNP definida no Algoritmo 4.3, calculando o valor da distância através da iteração sobre a rede, conforme mostrado no Algoritmo 4.8.

Algoritmo 4.8 – Cálculo da distância à jusante de um nó até a proteção mais próxima

```

poda = r.podar(no, alterar_rnp=True)
rnp = poda[0]
distancia = 0
for j in np.transpose(rnp):
    prof_, no_ = j
    if no_ != no:
        c, dt = d[no_]
        distancia += dt

```

Fonte: Própria

Com as informações de clientes à montante e distância à jusante dos equipamentos de proteção e manobra armazenadas, o cálculo do DMA é realizado conforme mostrado no algoritmo 4.9, através da multiplicação entre estes dois componentes, de modo a mostrar ao usuário os valores utilizados no cálculo, assim como seu resultado.

Algoritmo 4.9 – Cálculo do DMA

```

dma.append([consumidores,
            distancia,
            consumidores * distancia])
print 'dma no {i} => {c} * {d} = {dma}'.format(i=no,c=consumidores,
d=distancia, dma=consumidores*distancia)

```

Fonte: Própria

Para cada iteração sobre a quantidade de equipamentos realizada na rede, foi escolhido o DMA máximo, alocando este valor em uma string, definida no Algoritmo 4.10 como *max_dma*. Desta forma, foi possível obter os pontos eficientes de alocação dos equipamentos de proteção e manobra.

Algoritmo 4.10 – Indicação dos pontos eficientes de instalação para os DPM

```

for i in pontos_de_alocacao:
    dma[int(i)-1] = [0.0, 0.0, 0.0]

max_dma = 0
p = None
for i, j in enumerate(dma):
    if j[2] > max_dma:
        p = i + 1
        max_dma = j[2]

print '===\nNo escolhido para alocao => {p} '.format(p=p)
pontos_de_alocacao.append(str(p))

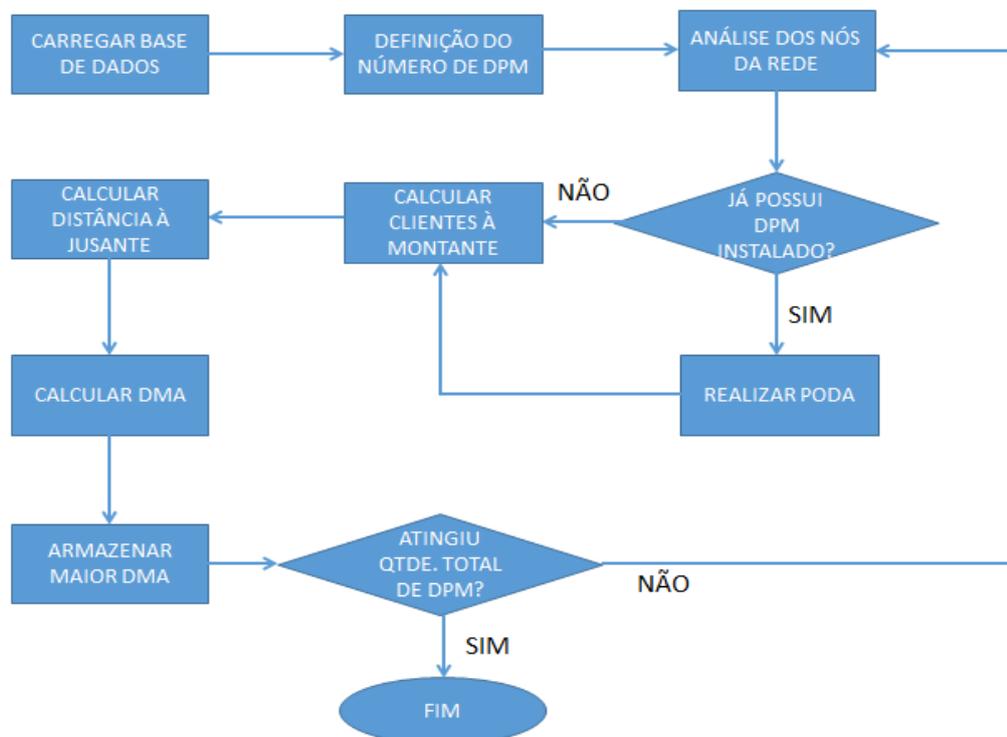
```

Fonte: Própria

4.2.7 Representação dos processos para definição dos pontos de alocação dos DPM

Na Figura 4.5, é representado o fluxograma para representação do processo do algoritmo, representando as principais etapas do processo de cálculo do DMA e posicionamento eficiente dos dispositivos de proteção e manobra (DPM), para melhor compreensão dos procedimentos realizados.

Figura 4.5 – Fluxograma para representação dos processos do algoritmo



Fonte: Própria

4.3 Considerações do capítulo

Neste capítulo foi apresentado o desenvolvimento do algoritmo de posicionamento eficiente dos dispositivos de proteção e equipamentos de manobra, detalhando os processos do algoritmo para realização do cálculo do DMA e indicação dos pontos ótimos de instalação. No próximo capítulo será realizado um estudo de caso em um alimentador da concessionária Enel Distribuição Ceará, utilizando o algoritmo apresentado neste capítulo para posicionamento dos DPM.

5 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Neste Capítulo são apresentados os estudo de caso da aplicação do algoritmo desenvolvido em um alimentador, suprido pela subestação Pacajus, localizada em Pacajus-CE. Para ilustrar o comparativo da metodologia do biproduto utilizada pela concessionária e a metodologia do desempenho máximo de um alimentador (DMA), abordada neste trabalho, são apresentados os posicionamentos resultantes da aplicação de cada uma das técnicas. Neste capítulo são apresentados também os resultados das simulações para o cálculo do indicador FEC.

5.1 Metodologia biproduto

A metodologia denominada biproduto consiste em posicionar os pontos de instalação dos equipamentos de proteção com base no critério em que a soma dos produtos da quantidade de clientes pelo valor da distância existente entre os possíveis pontos de alocação deve ser o menor possível. Para alcançar um valor ótimo utilizando o biproduto, os valores dos produtos entre os pontos de alocação devem possuir equilíbrio entre si. Devido aos valores de clientes e distância possuírem o mesmo peso, deve-se dimensionar a rede considerando ambos os elementos. Para p dispositivos de proteção e manobra, o biproduto é calculado por meio da equação (10):

$$B = \sum_{i=0}^{i=z} C_i \cdot L_i \quad (10)$$

Em que,

- B: Biproduto
- z: Quantidade de zonas
- C_i : Quantidade de clientes entre os equipamentos p e $p-1$;
- L_i : Distância entre os equipamentos p e $p-1$;

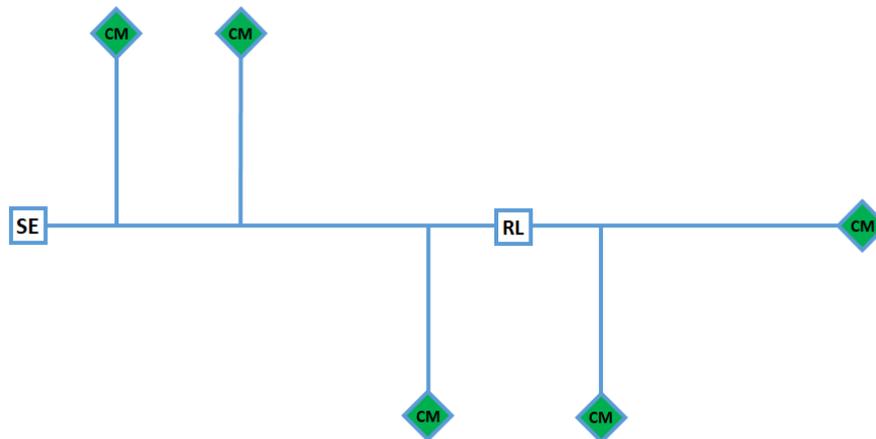
O estudo do biproduto leva em consideração que o alimentador deve ser dividido em zonas, (trechos entre dois equipamentos de proteção) e que o projetista deve supor pelo menos duas hipóteses para alocação dos dispositivos de proteção e manobra (DPM). A aplicação do biproduto na escolha dos pontos ótimos de instalação dos equipamentos de proteção segue os critérios:

- a) Considera-se a instalação de religadores no tronco do alimentador e em ramais em pontos que apresentem grande densidade de clientes, levando em consideração o limite de quatro religadores em cascata, devido a coordenação;
- b) Considera-se a instalação de chaves seccionadoras automáticas geralmente à jusante dos religadores em trechos que maximizem a quantidade de clientes à montante do equipamento;
- c) Considera-se a instalação de chaves seccionadoras automáticas em encontros de alimentadores;
- d) O biproduto será o resultado do produto entre o número de clientes e a distância existente em uma dada zona.

Dessa forma, para um determinado alimentador, são calculados os valores de biproduto para cada zona onde em que o resultado final de uma hipótese é a soma de todos os valores calculados em suas respectivas zonas. Em geral, para cada alimentador devem ser calculadas no mínimo três hipóteses. A hipótese que possuir o menor valor total de biproduto possuir a melhor disposição dos equipamentos.

Na Figura 5.1 é apresentada a condição atual de um alimentador utilizado como exemplo para aplicação do método biproduto.

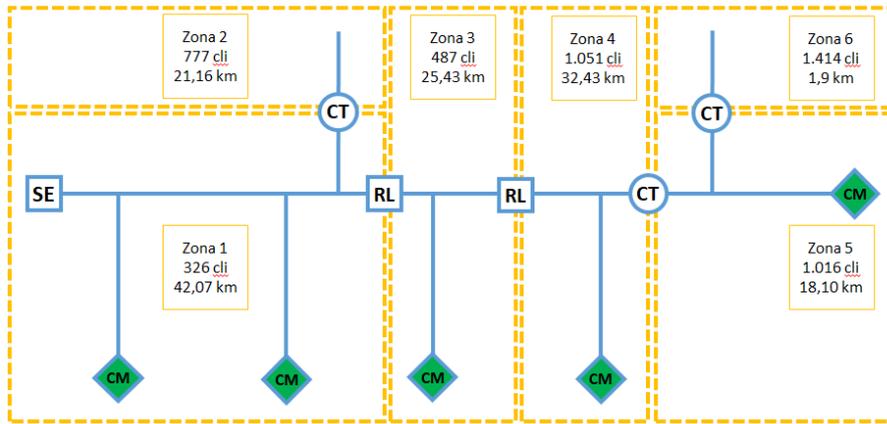
Figura 5.1 – Alimentador exemplo



Fonte: Própria

Na Figura 5.2 é apresentada a hipótese 1, com a disposição dos equipamentos de proteção e manobra propostos pelo projetista, com a discriminação das zonas, a quantidade de clientes e os valores de distâncias para cada zona.

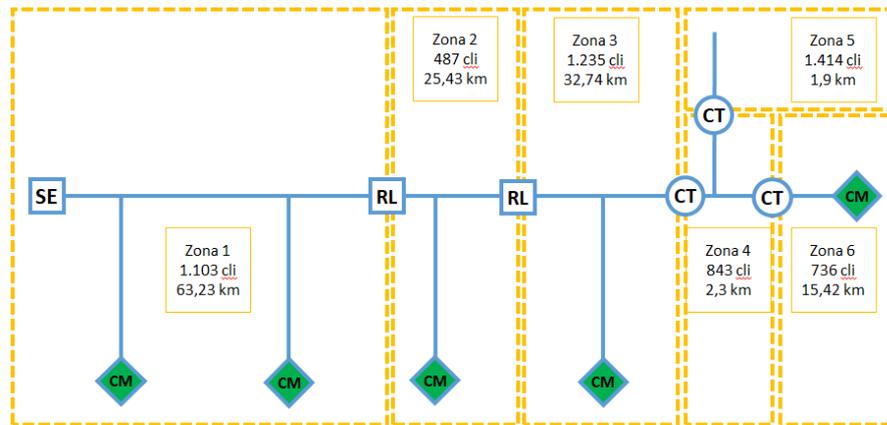
Figura 5.2 – Alocação dos DPM para a hipótese 1



Fonte: Própria

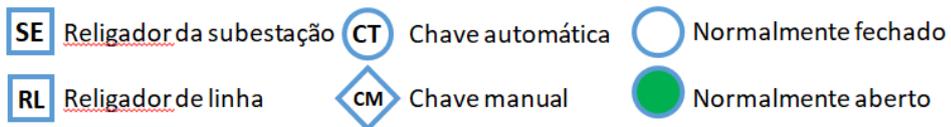
Na Figura 5.3 é apresentada a hipótese 2, com a disposição dos equipamentos de proteção e manobra propostos pelo projetista

Figura 5.3 – Alocação dos DPM para a hipótese 2



Fonte: Própria

LEGENDA:



A Tabela 5.1 apresenta os valores de biproduto obtidos para cada hipótese, em que para este caso, a hipótese 1 é adotada por possuir menor valor de biproduto.

Tabela 5.1 – Valores de biproduto para hipóteses

HIPÓTESE 1							
Zonas	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Biproduto total
Clientes	327	777	487	1051	1616	1414	108606,02
Distância (km)	42,08	21,16	25,43	32,43	18,1	1,9	
Biproduto	13760,16	16441,32	12384,41	34083,93	29249,6	2686,6	
HIPÓTESE 2							
Zonas	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Biproduto total
Clientes	1103	487	1235	843	1414	736	138535,62
Distância (km)	63,23	25,43	32,74	2,3	1,9	15,42	
Biproduto	69742,69	12384,41	40433,9	1938,9	2686,6	11349,12	

Fonte: Própria

5.2 Apresentação dos pontos propostos

O alimentador adotado para a realização do estudo de caso foi o PCJ01P4, que pertence à subestação de Pacajus e está localizado no município de Pacajus-CE, em uma região de sertão. O alimentador PCJ01P4 possui 4.516 clientes e 12,20 km de extensão. Na Figura 5.4 é mostrada a visualização do alimentador PCJ01P4 através do programa Google Earth. Este alimentador foi adotado devido a ausência de equipamentos de proteção e manobra e por este ser contemplado pelo projeto telecontrole para automatização da sua rede.

Figura 5.4 – Alimentador PCJ01P4

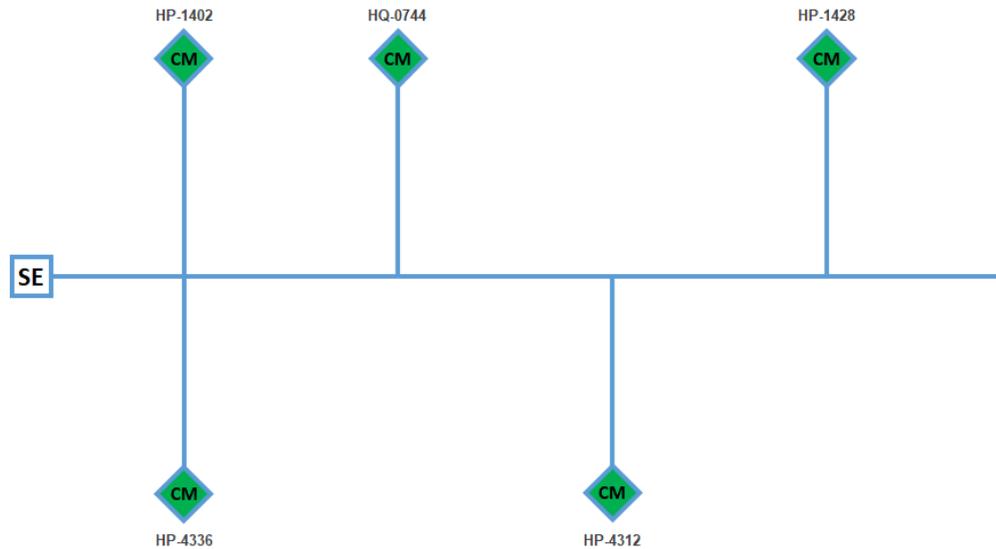


Fonte: Enel Distribuição Ceará (2017)

A Figura 5.5 mostra um resumo da disposição atual da rede aérea de MT do alimentador PCJ01P4, que pode ser observada com maior riqueza de detalhes no Anexo 1 através da instrução de operação do alimentador. Neste alimentador são aplicadas as

metodologias de biproduto e de DMA a fim de obter os pontos de instalação dos equipamentos de proteção apontados por cada método. Os equipamentos e quantidades de equipamentos neste alimentador devem ser propostos pelo projeto telecontrole, que neste caso, propôs a instalação de três religadores de linha e três chaves automáticas.

Figura 5.5 – Representação unifilar do alimentador PCJ01P4



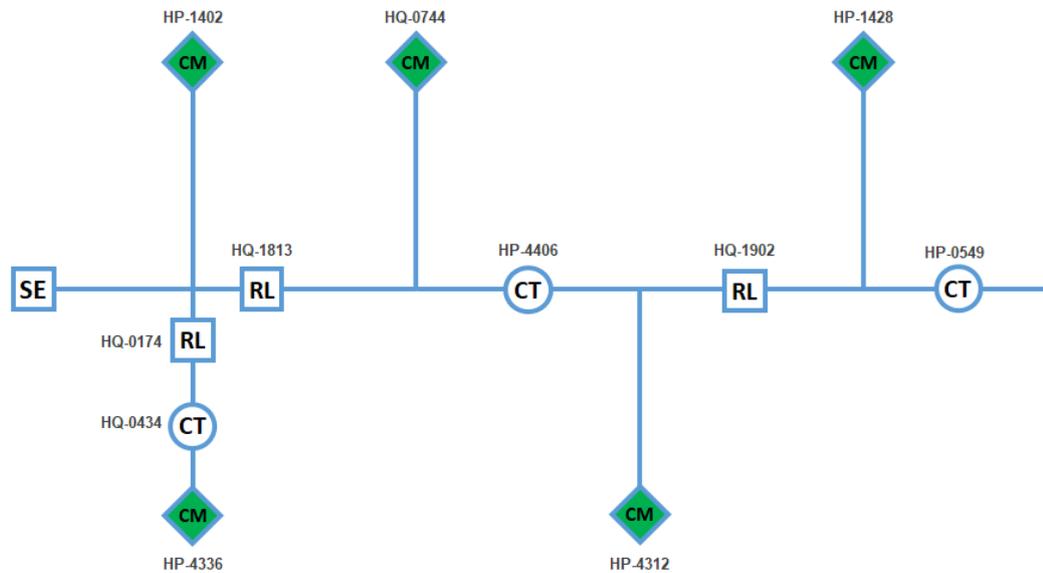
Fonte: Própria

5.2.1 Apresentação dos pontos de alocação de DPM através do método do biproduto

Conforme mencionado, o cálculo do biproduto é realizado de forma empírica através da suposição de possíveis pontos de alocação dos equipamentos de manobra e proteção de modo a tornar os valores individuais dos biprodutos do alimentador o mais equilibrado possível. Desta forma, são propostas hipóteses que apresentem possíveis disposições dos DPMs de modo que a escolha da melhor hipótese seja àquela que possua o menor valor do biproduto.

A partir de uma quantidade de equipamentos pré-definida pela área de planejamento da concessionária, a área de manutenção do departamento deve apontar os pontos a serem alocados os DPMs utilizando o critério do biproduto. Desta forma, os pontos escolhidos para a alocação dos equipamentos de proteção e manobra estão resumidos na Figura 5.6, contabilizando três religadores e três chaves automáticas de eixo.

Figura 5.6 – Disposição dos pontos indicados pelo método do biproduto



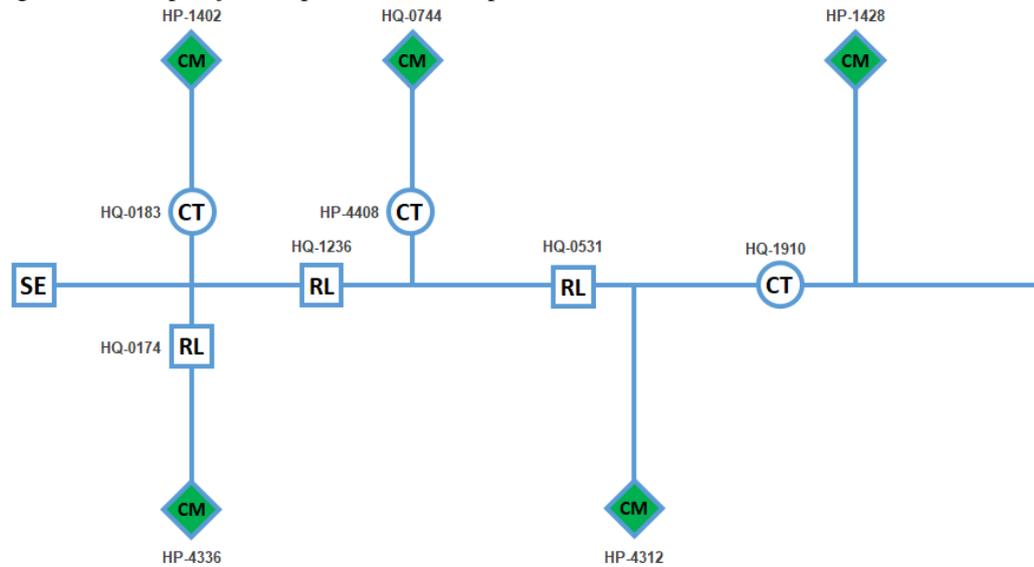
Fonte: Própria

5.2.2 Apresentação dos pontos de alocação de DPM através do método do DMA

A utilização do critério de DMA baseia-se nos conceitos descritos no Capítulo 3, desenvolvidos no trabalho de (MAIA, 2013). Para a realização deste método, foi necessária a utilização de *software* desenvolvido em linguagem de programação Python, utilizando a biblioteca MyGrid, sendo possível a análise dos pontos de instalação de DPMs em toda a extensão do alimentador, para que não houvesse uma avaliação empírica, como realizada na metodologia da concessionária.

Desta forma, foi desenvolvido um algoritmo que pudesse calcular os valores de DMA para cada ponto de instalação de um DPM, conforme descrito no Capítulo 4, e apontar posições eficientes de instalação através da escolha do maior valor de DMA para cada análise de pontos. A aplicação do algoritmo sugeriu os pontos ilustrados na Figura 5.7.

Figura 5.7 – Disposição dos pontos indicados pelo método do DMA



Fonte: Própria

5.3 Análise comparativa

O método DMA, assim como o método biproduto, indica apenas posições a serem localizados os dispositivos de proteção e manobra, de forma que o tipo de equipamento deve ser definido pelo projetista. Para o DMA, considerou-se apenas a realocação dos dispositivos para pontos mais eficientes.

A escolha dos pontos eficientes para localização dos dispositivos de proteção e manobra através do algoritmo desenvolvido utilizando o DMA resultou em realocações de cinco posições de equipamentos apontados pelo método do biproduto.

Através das Figuras 5.6 e 5.7 é possível perceber que os pontos indicados pelo método do DMA estão bem próximos aos pontos indicados pelo método do biproduto, mostrando que o desempenho máximo de um alimentador pode ser utilizado na definição dos pontos de instalação dos DPM, podendo sofrer pequenas alterações que requerem conhecimento de campo.

5.4 Simulações e resultados

A instalação dos equipamentos de proteção e manobra na rede aérea de média tensão visa principalmente reduzir o número de clientes afetados através do seccionamento e recomposição automática do sistema. As metodologias citadas neste trabalho possuem a finalidade de gerar posicionamento eficiente de instalação dos DPM de modo a reduzir o

indicador FEC. Para a realização da comparação entre os dois métodos, serão realizadas simulações de faltas na rede aérea de média tensão objetivando calcular os valores de FEC e compara-los.

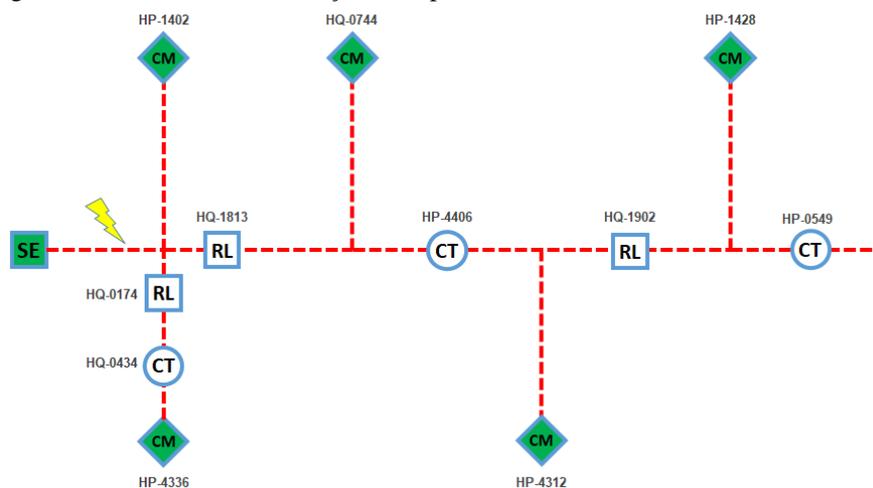
As simulações considerarão faltas em sete trechos, presentes entre os DPM encontrados em cada metodologia apresentada, considerando faltas que provoquem a atuação dos equipamentos imediatamente à montante. Para cada método, serão calculados os valores do FEC no alimentador, em cada um dos sete trechos com faltas, obtendo um valor de FEC total, correspondente a soma dos valores parciais do indicador.

5.4.1 Simulação do FEC para a metodologia do biproduto

5.4.1.1 Situação 1

Na situação 1 a primeira falta é simulada entre a subestação e o religador HQ-1813. Esta falta provocará uma sobrecorrente no sistema que causa a abertura do religador presente na subestação, gerando a falta de energia elétrica em todos os clientes do alimentador, ao total 4.994 clientes, conforme apresentado na Figura 5.8. Com a abertura do religador da subestação, o centro de controle da concessionária será responsável por operar o sistema de modo a isolar o trecho afetado.

Figura 5.8 - Ocorrência de situação 1.- biproduto

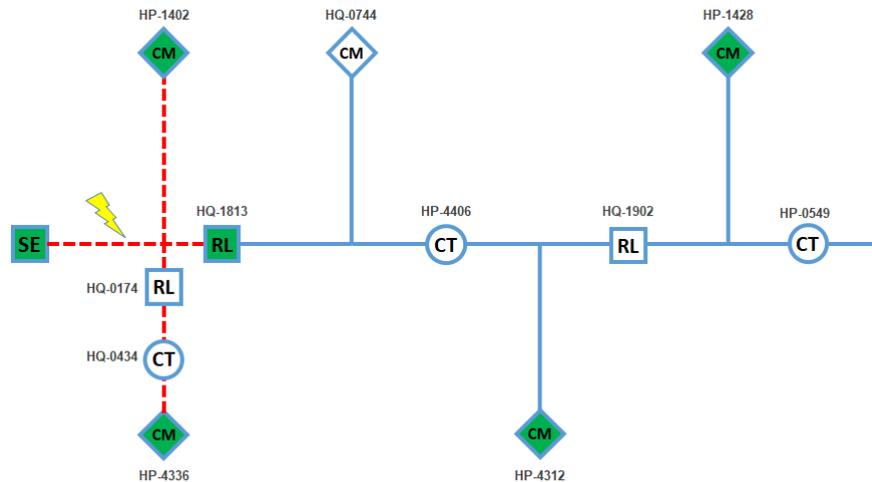


Fonte: Própria

O centro de controle realiza a operação de abertura do religador HQ-1813 e a equipe realizará o procedimento de fechamento da chave de encontro HQ-0744, reduzindo o número de clientes afetados para 1.953, conforme Figura 5.9. Posteriormente, o centro de controle realiza a operação de abertura do religador HQ-0174, e a equipe realiza o fechamento

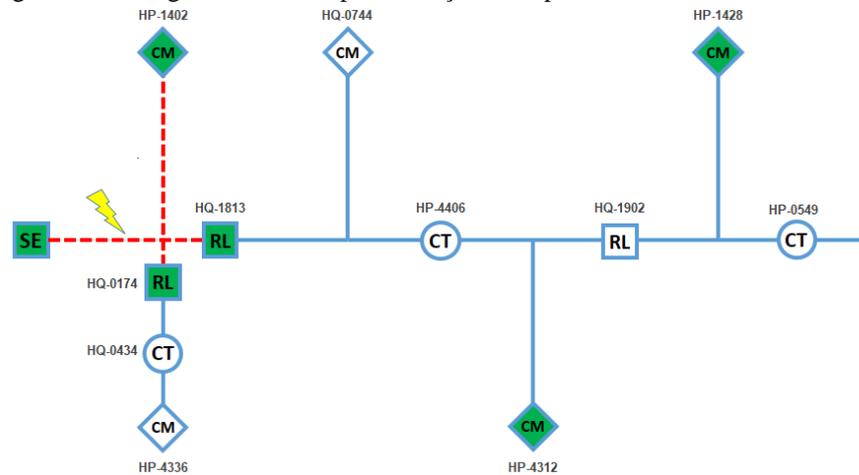
da chave de encontro HP-4336, reduzindo o número de clientes desenergizados para 390, conforme Figura 5.10. Após as operações, a equipe pode inspecionar o trecho afetado e solucionar a falta mostrada na Figura 5.10, reenergizando os clientes ainda afetados pelo defeito.

Figura 5.9 – Primeira manobra para situação 1 - biproduto



Fonte: Própria

Figura 5.10 – Segunda manobra para situação 1 - biproduto



Fonte: Própria

O cálculo do FEC para a situação 1 é realizado a seguir, conforme a Equação (11):

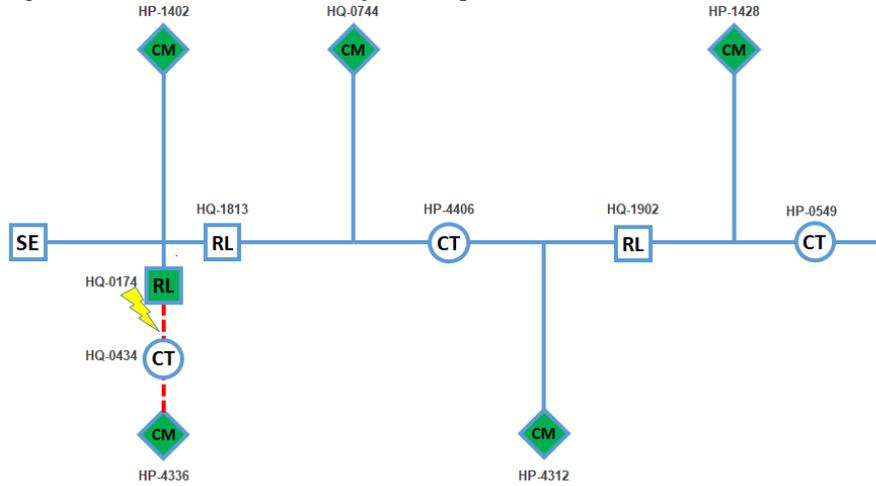
$$FEC_1 = \frac{4494}{4494} + \frac{1953}{4494} + \frac{390}{4494} = 1,5214 \quad (11)$$

5.4.1.2 Situação 2

A segunda situação possui falta entre o relógio HQ-0174 e a chave automática HQ-0434. A falta provocará uma sobrecorrente que será detectada pelo relógio HQ-0174,

que atuará de modo a desenergizar todos os clientes à sua jusante, conforme mostrado na Figura 5.11, um total de 1.557 clientes afetados.

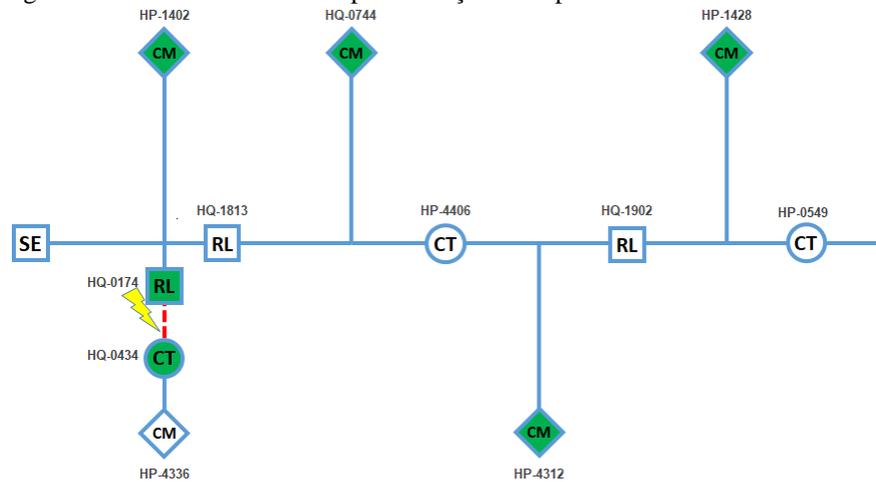
Figura 5.11 – Ocorrência de situação 2 - biproduto



Fonte: Própria

A recomposição das cargas é realizada por meio de comando de abertura da chave automática HQ-0434 e fechando manualmente a chave de encontro HP-4336, conforme mostrado na Figura 5.12. Os clientes afetados do trecho entre estes equipamentos são reduzidos e o número de clientes desenergizados passa a ser de 806.

Figura 5.12 – Primeira manobra para situação 2 - biproduto



Fonte: Própria

O FEC calculado para este trecho é:

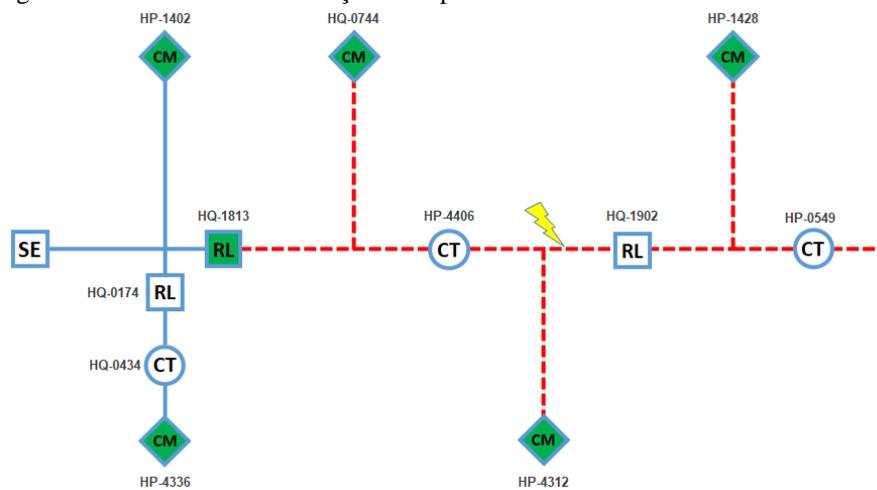
$$FEC_2 = \frac{1557}{4494} + \frac{806}{4494} = 0,5258 \quad (12)$$

$$FEC_4 = \frac{2548}{4494} + \frac{609}{4494} = 0,6994 \quad (14)$$

5.4.1.5 Situação 5

A situação 5 apresentará uma falta entre a chave automática HP-4406 e o religador HQ-1902. Neste caso, a falta causa a abertura do religador HQ-1813, afetando 2.538 clientes, conforme Figura 5.17.

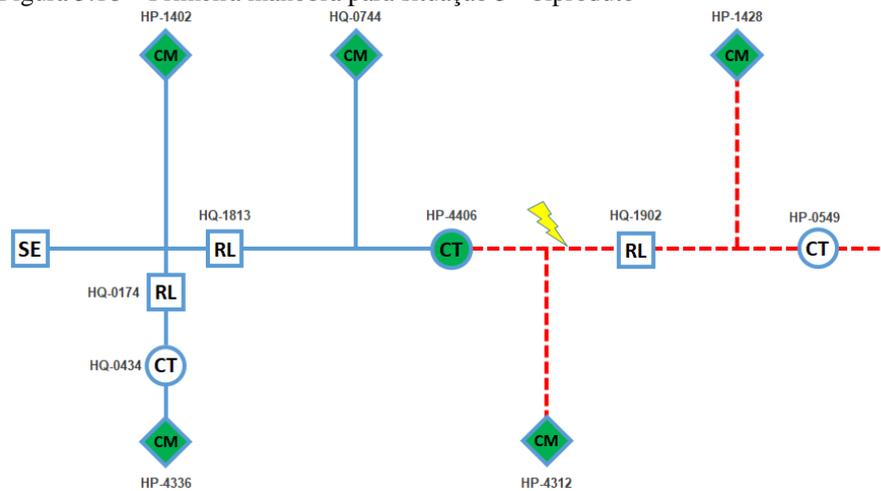
Figura 5.17 – Ocorrência de situação 5 - biproducto



Fonte: Própria

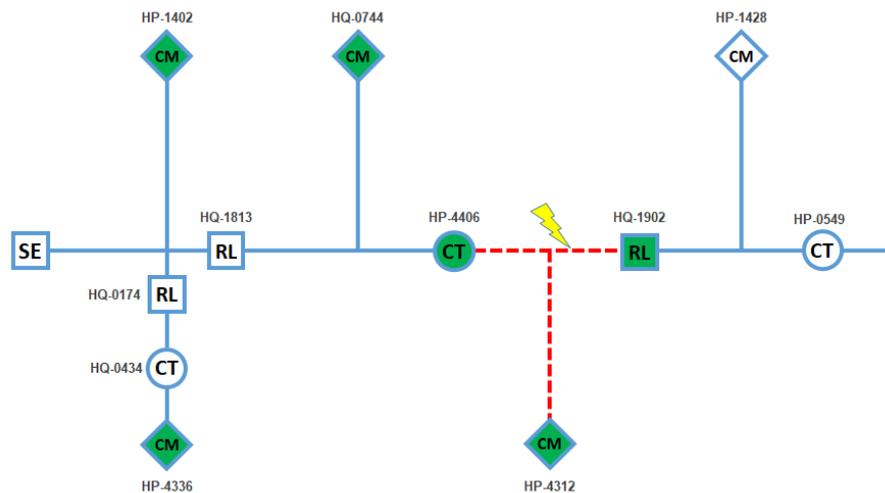
A seguir o centro de controle executa o comando de abertura da chave automática HP-4406 e fechamento do religador HQ-1813, reduzindo a quantidade de clientes afetados para 1.933 clientes, antes de três minutos, não contabilizando no indicador FEC, conforme Figura 5.18. Posteriormente, é realizada remotamente a abertura do religador HQ-1902 e manualmente o fechamento da chave de encontro HP-1428, reduzindo o número de clientes desenergizados para 570, conforme Figura 5.19.

Figura 5.18 – Primeira manobra para situação 5 - biproducto



Fonte: Própria

Figura 5.19 – Segunda manobra para situação 5 - biproducto



Fonte: Própria

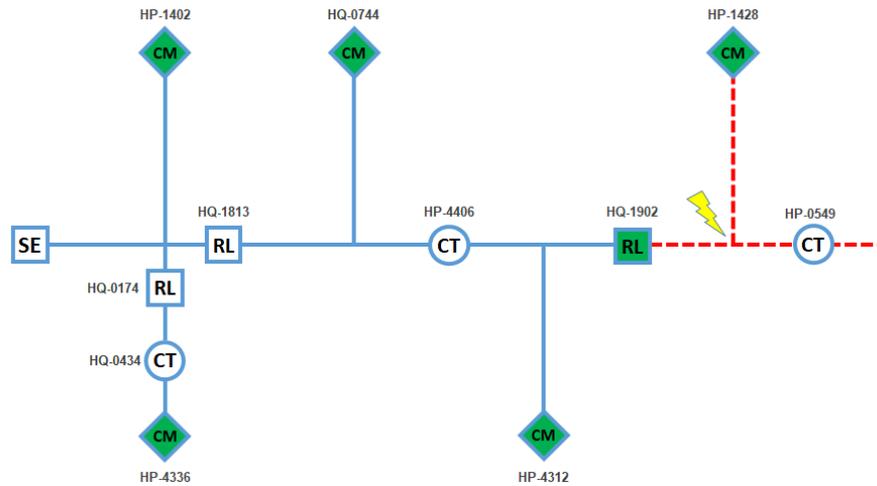
O FEC calculado para este trecho é:

$$FEC_5 = \frac{1933}{4494} + \frac{570}{4494} = 0,5570 \quad (15)$$

5.4.1.6 Situação 6

A falta para a situação 6 é simulada entre o religador HQ-1902 e a chave automática HP-549. A falta provoca a abertura do religador HQ-1902 afetando 1.363 clientes, conforme mostrado na Figura 5.20. Devido à disposição dos equipamentos e a localização da falta, não é possível realizar uma recomposição do sistema, ficando então estes clientes desenergizados até a correção da falta.

Figura 5.20 – Ocorrência de situação 6



Fonte: Própria

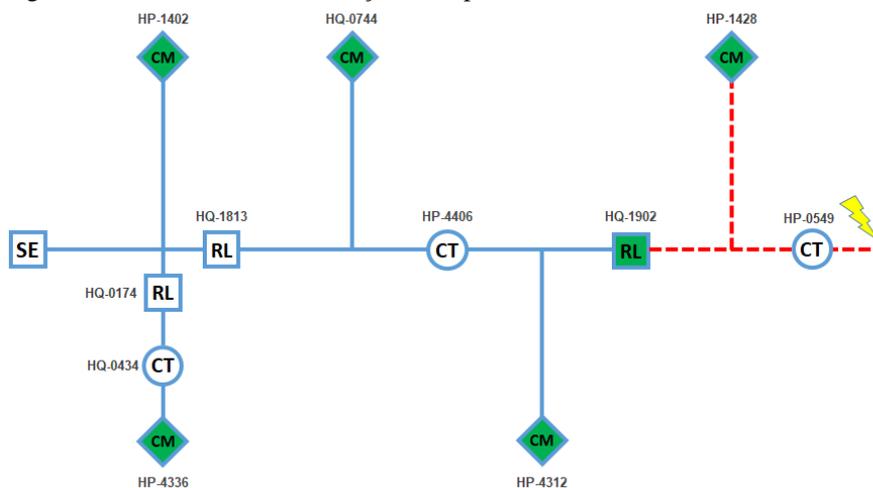
O FEC calculado para este trecho é:

$$FEC_6 = \frac{1363}{4494} = 0,3033 \quad (16)$$

5.4.1.7 Situação 7

O trecho da falta simulada da na situação 7 será à jusante da chave automática HP-0549. Uma falta neste trecho implica na abertura do religador HQ-1902, afetando 1.363 clientes, conforme Figura 5.21.

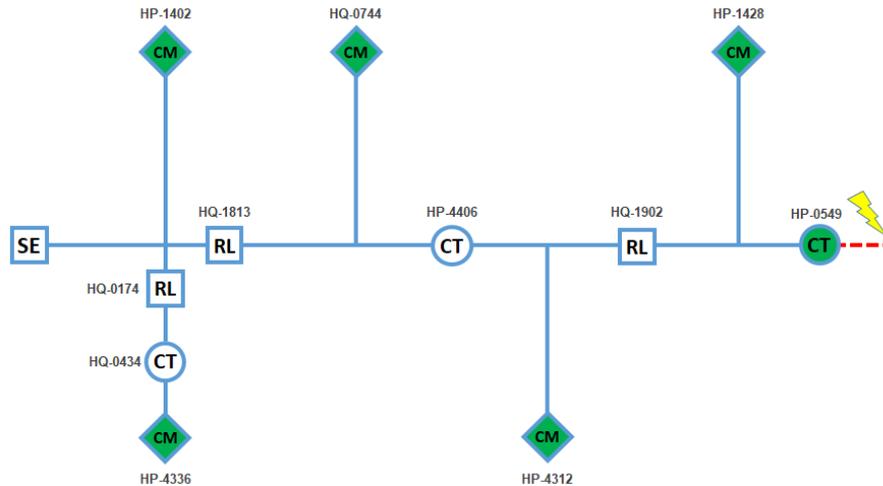
Figura 5.21 – Ocorrência de situação 7 - biproducto



Fonte: Própria

A recomposição de clientes é realizada através da abertura remota da chave automática HP-0549 e o fechamento do religador HQ-1902, em um tempo inferior a três minutos, isolando o trecho afetado e reduzindo o número de clientes desenergizados para 532, conforme Figura 5.22.

Figura 5.22 – Primeira manobra para situação 7 - biproduto



Fonte: Própria

O FEC calculado para este trecho é de:

$$FEC_7 = \frac{532}{4494} = 0,1184 \quad (17)$$

O FEC total para as simulações realizadas na disposição de equipamentos apontados pelo biproduto é obtido através da equação (18):

$$FEC_{biproduto} = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + F_6 + F_7 \quad (18)$$

$$FEC_{biproduto} = 1,5214 + 0,5258 + 0,1671 + 0,6994 + 0,5570 + 0,3033 + 0,1184 \quad (19)$$

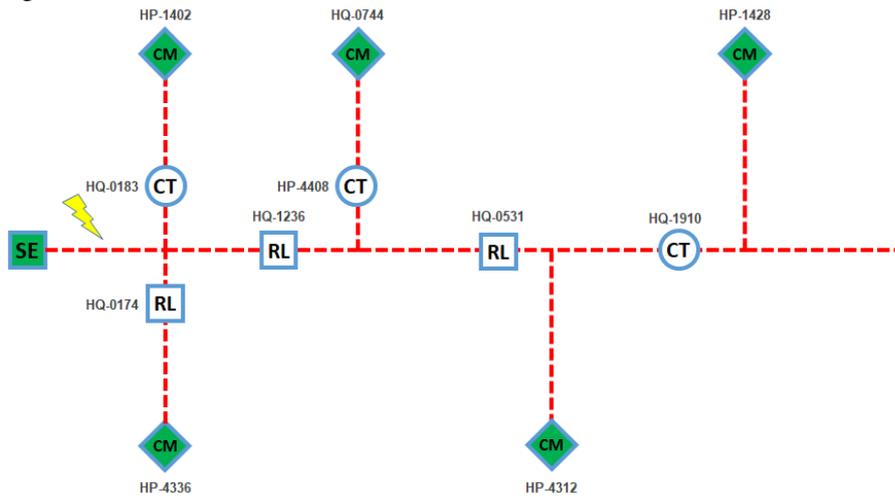
$$FEC_{biproduto} = 3,8923 \quad (20)$$

5.4.2 Simulação do FEC para a metodologia do DMA

5.4.2.1 Situação 1

A primeira falta é simulada na disposição de equipamentos encontradas através do método DMA é entre a subestação e o equipamento HQ-1236. A falta provoca a afetação de todos os clientes do alimentador, um total de 4.494 clientes, conforme mostrado na Figura 5.23.

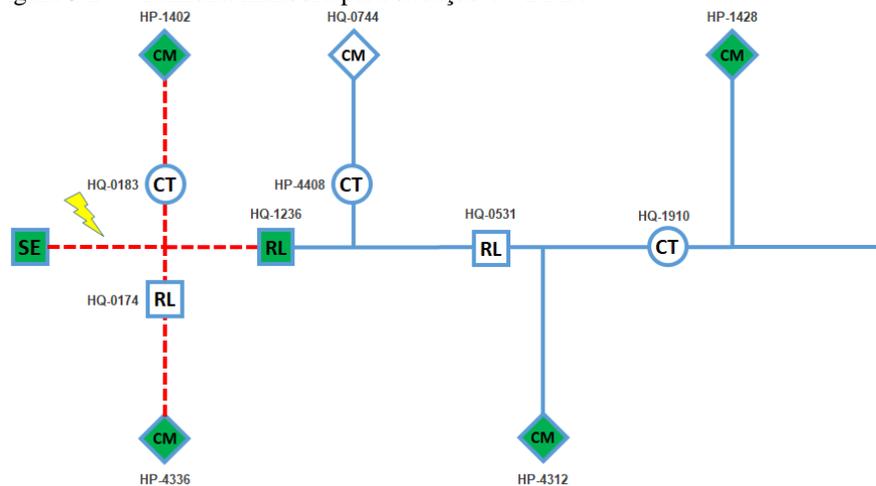
Figura 5.23 – Ocorrência de falta 1 - DMA



Fonte: Própria

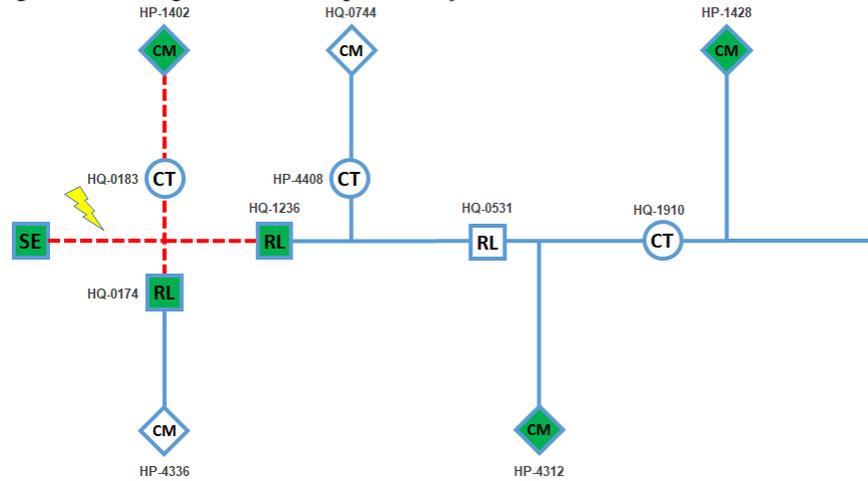
Para seccionamento da rede e redução dos clientes afetados, o religador HQ-1236 é operado remotamente com comando de abertura, e a chave de encontro HQ-0744 será fechada manualmente, reduzindo a afetação para 2.017 clientes, conforme mostrado na Figura 5.24. Posteriormente, é realizada a abertura do religador HQ-0174 e o fechamento manual da chave de encontro HP-4336, reduzindo a afetação para 460 clientes, conforme Figura 5.25. Por fim, será simulada a abertura remota da chave automática HQ-0183 e o fechamento manual da chave de encontro HP-1402, reduzindo o número de clientes desenergizados para 222, conforme Figura 5.26.

Figura 5.24 – Primeira manobra para situação 1 - DMA



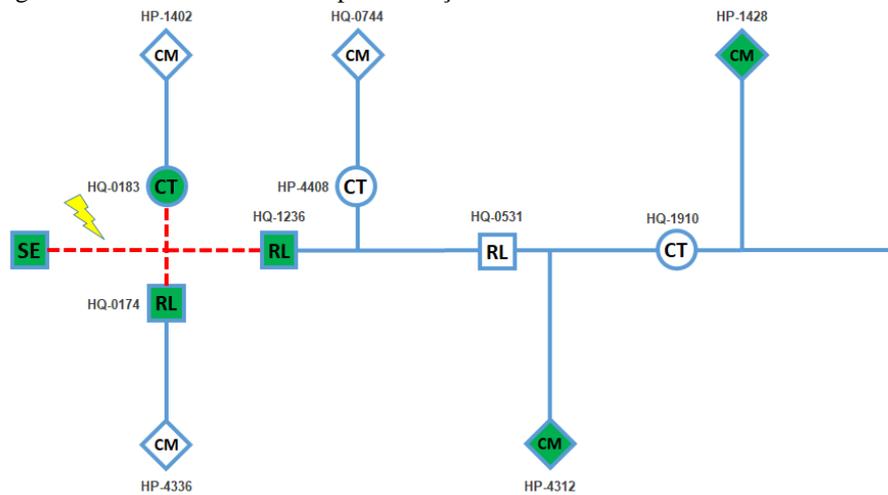
Fonte: Própria

Figura 5.25 – Segunda manobra para situação 1 - DMA



Fonte: Própria

Figura 5.26 – Terceira manobra para situação 1 - DMA



Fonte: Própria

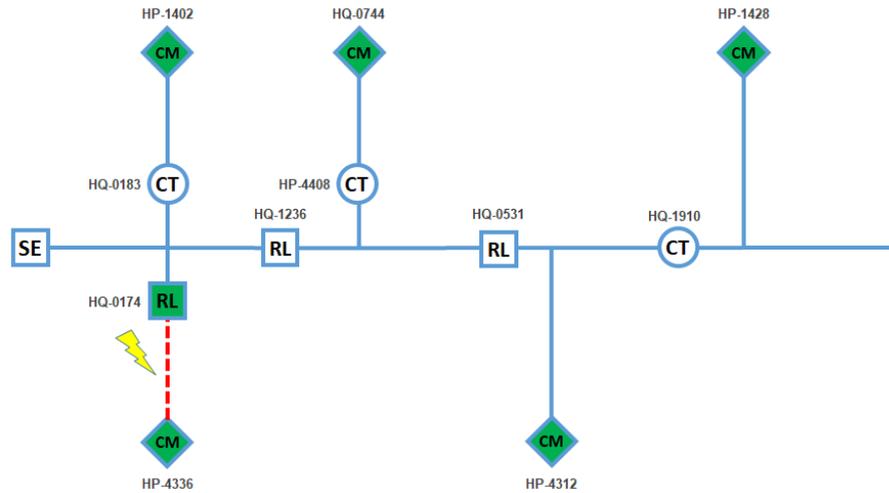
O FEC encontrado para a ocorrência da falta 1 é de:

$$FEC_1 = \frac{4494}{4494} + \frac{2017}{4494} + \frac{460}{4494} + \frac{222}{4494} = 1,6006 \quad (21)$$

5.4.2.2 Situação 2

A segunda situação provoca uma falta no trecho entre o religador HQ-0174 e a chave de encontro HP-4336. A falta provoca a atuação do religador HQ-0174 afetando 1.557 clientes, conforme mostrado na Figura 5.27 Não há recomposição de carga de clientes desenergizados, pois o trecho da falta não permite mais manobras.

Figura 5.27 – Ocorrência de situação 2 - DMA



Fonte: Própria

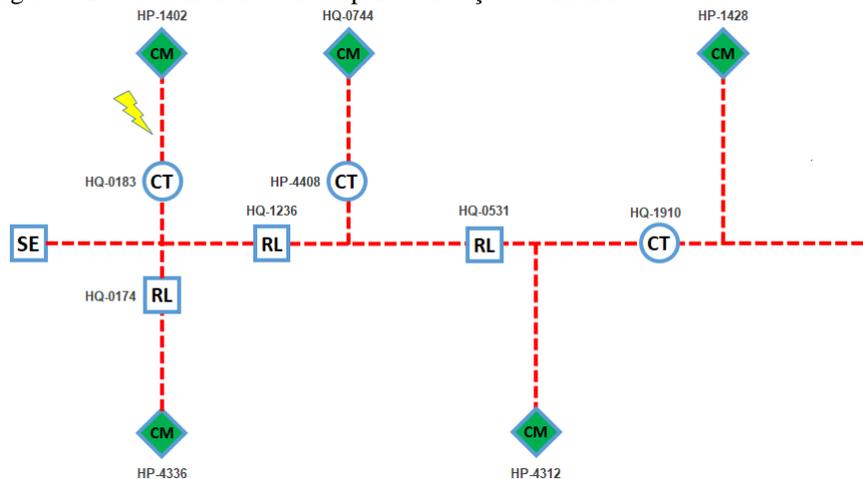
O FEC encontrado para a ocorrência da falta 1 é de:

$$FEC_2 = \frac{1557}{4494} = 0,3465 \quad (22)$$

5.4.2.3 Situação 3

O trecho de falta considerado para a situação 3 é entre a chave automática HQ-0183 e a chave de encontro HP-1402. A ocorrência de falta neste trecho será detectada pelo relâmpago da subestação afetando, portanto todos os clientes do alimentador, 4.494 clientes, conforme mostrado na Figura 5.28.

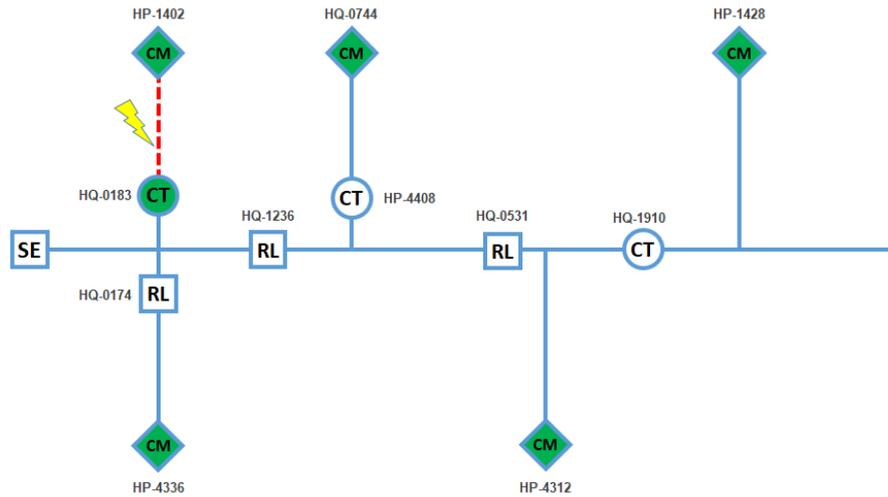
Figura 5.28 – Ocorrência de falta para a situação 3 - DMA



Fonte: Própria

Porém, através da abertura remota da chave automática HQ-0183, o trecho de afetação é reduzido com tempo inferior a três minutos, afetando 238 clientes, conforme mostrado na Figura 5.29.

Figura 5.29 – Primeira manobra para situação 3 - DMA



Fonte: Própria

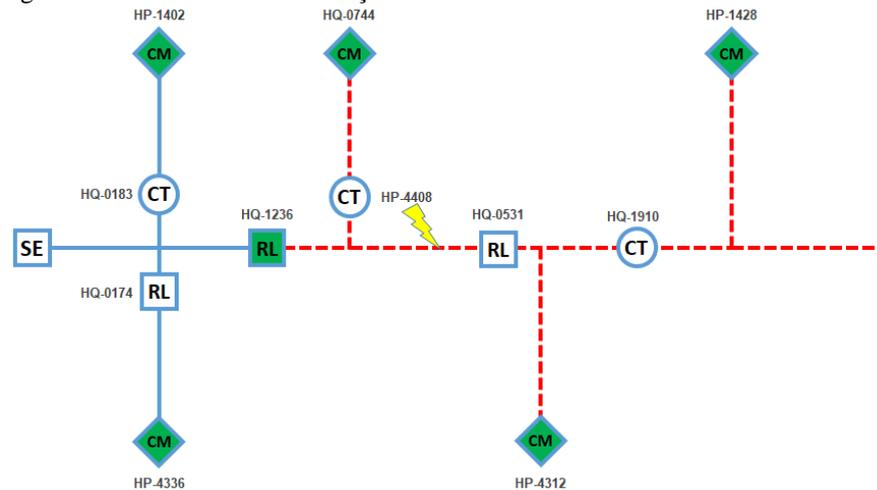
O FEC para a falta neste trecho será:

$$FEC_3 = \frac{238}{4494} = 0,0503 \quad (23)$$

5.4.2.4 Situação 4

A falta para a situação 4 ocorrerá no trecho entre o relógio HQ-1236 e o relógio HQ-0531. A sobrecorrente ocasionada pela falta é detectada pelo relógio HQ-1236 afetando 2.477 clientes, conforme mostrado na Figura 5.30.

Figura 5.30 – Ocorrência de situação 4 - DMA

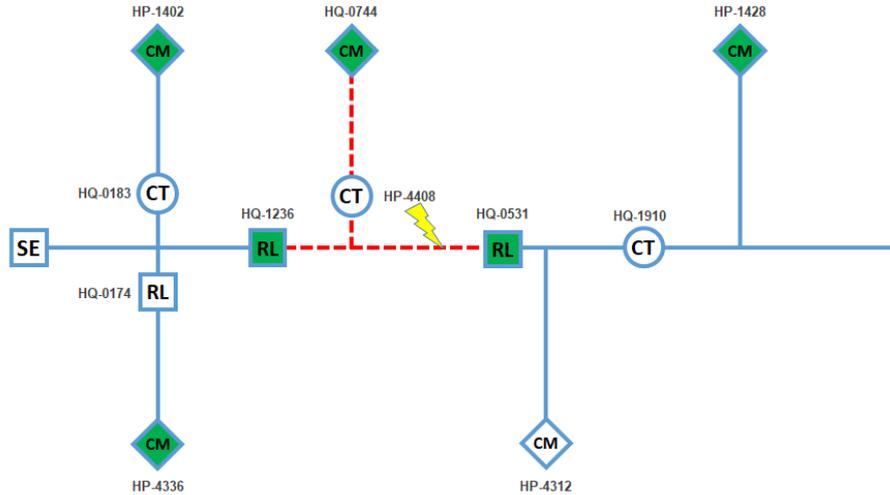


Fonte: Própria

A recomposição dos clientes é realizada primeiramente realizando a abertura remota do relógio HQ-0531 e fechamento manual da chave de encontro HP-4312, reduzindo a afetação para 780 clientes, conforme mostrado na Figura 5.31. Posteriormente a chave

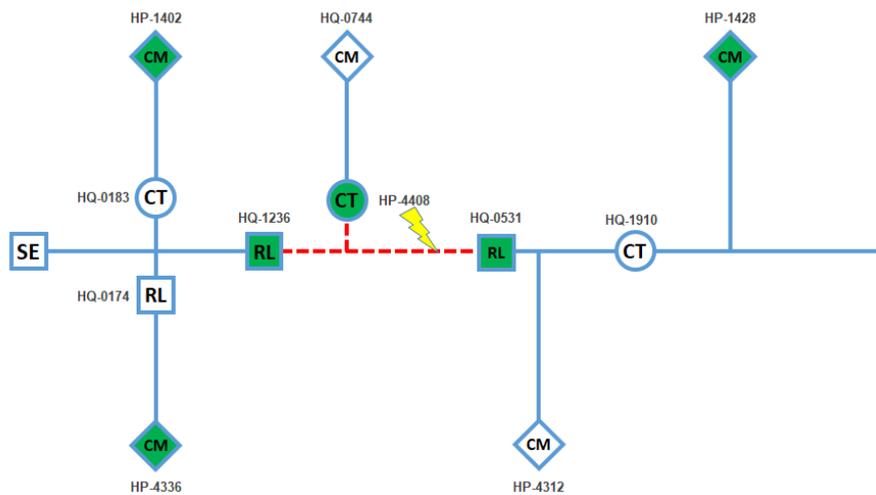
automática HP-4408 é aberto remotamente e a chave de encontro é fechada manualmente reduzindo o número de clientes desenergizados para 432, conforme mostrado na Figura 5.32.

Figura 5.31 – Primeira manobra para situação 4 - DMA



Fonte: Própria

Figura 5.32 – Segunda manobra para situação 4 - DMA



Fonte: Própria

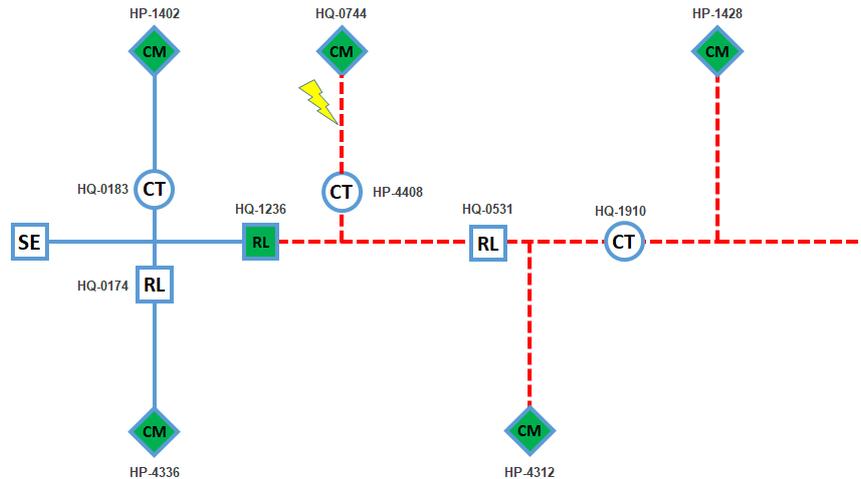
O FEC calculado para esta falta será

$$FEC_4 = \frac{2477}{4494} + \frac{780}{4494} + \frac{432}{4494} = 0,8209 \quad (24)$$

5.4.2.5 Situação 5

Na situação 5 uma falta é simulada no trecho entre a chave automática HP-4408 e a chave de encontro HQ-0744. A falta ocasiona a saída do relagador HQ-1236 conforme mostrado na Figura 5.33.

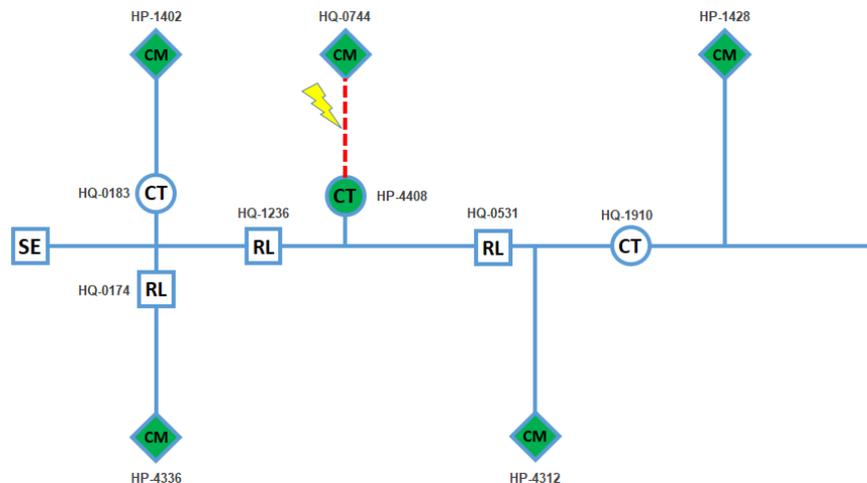
Figura 5.33 – Ocorrência de situação 5 - DMA



Fonte: Própria

O centro de controle executará o comando de abertura da chave automática HP-4408 e o fechamento do religador HQ-1236 em um tempo inferior a três minutos, sendo assim não contabilizando para o FEC, e reduzindo o número de clientes desenergizados para 348, conforme mostrado na Figura 5.34.

Figura 5.34 – Primeira manobra para situação 5 - DMA



Fonte: Própria

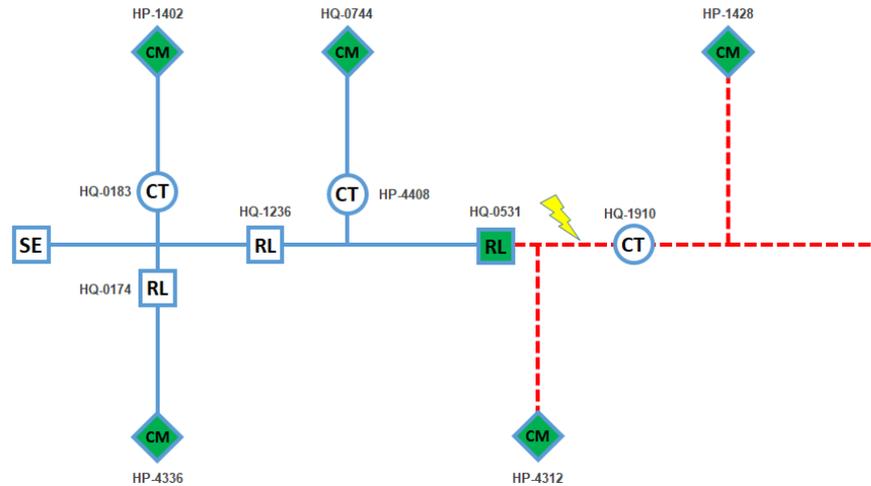
O FEC para este trecho será:

$$FEC_5 = \frac{348}{4494} = 0,0774 \quad (25)$$

5.4.2.6 Situação 6

Para a situação 6 o trecho de falta considerado será entre o religador HQ-0531 e a chave automática HQ-1910. A falta ocasionará uma sobrecorrente afetando o religador HQ-0531 e afetando 1.697 clientes, conforme mostrado na Figura 5.35.

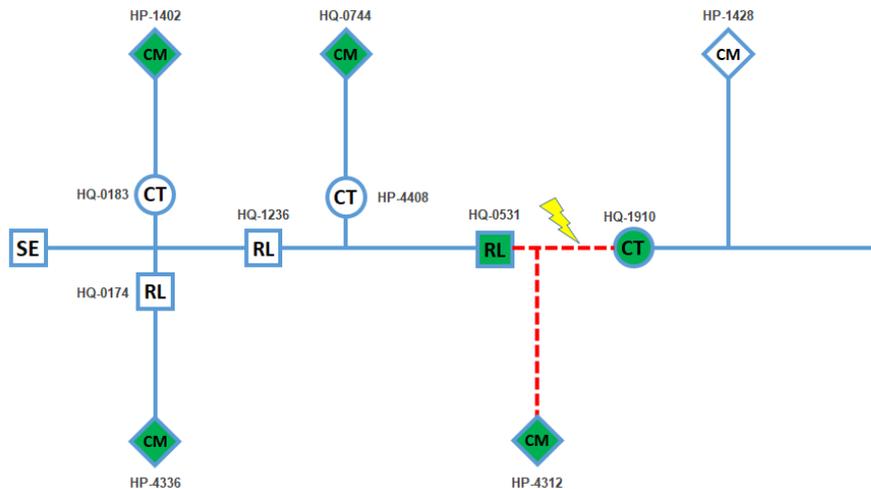
Figura 5.35 – Ocorrência de situação 6 - DMA



Fonte: Própria

A falta de fornecimento de energia elétrica poderá ser seccionada através da abertura remota da chave automática HQ-1910, e o fechamento manual da chave de encontro HQ-1428, reduzindo o número de clientes desenergizados para 1.027, conforme mostrado na Figura 5.36.

Figura 5.36 – Primeira manobra para situação 6 - DMA



Fonte: Própria

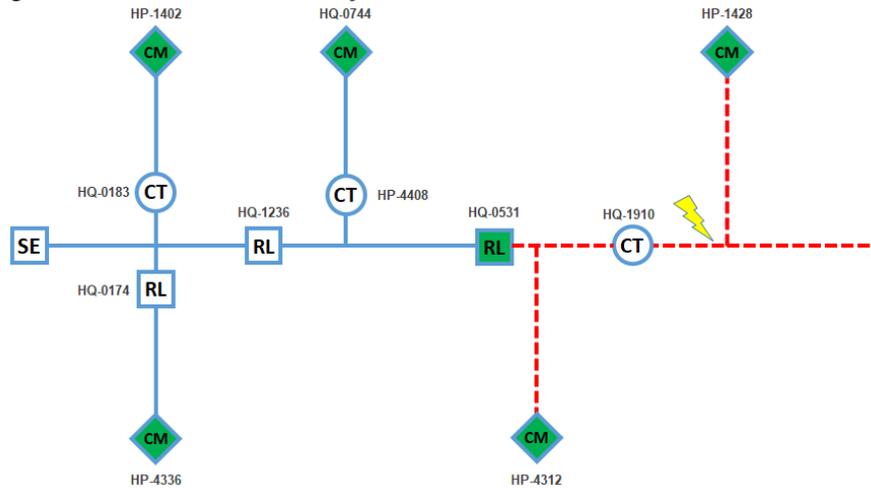
O FEC para este trecho será:

$$FEC_6 = \frac{1697}{4494} + \frac{1027}{4494} = 0,6061 \quad (26)$$

5.4.2.7 Situação 7

Por fim, a situação 7 implicará na falta no trecho à jusante da chave automática HQ-1910. A sobrecorrente ocasionada pela falta neste trecho será detectada pelo religador HQ-0531, afetando 1.697 clientes, conforme mostrado na Figura 5.37.

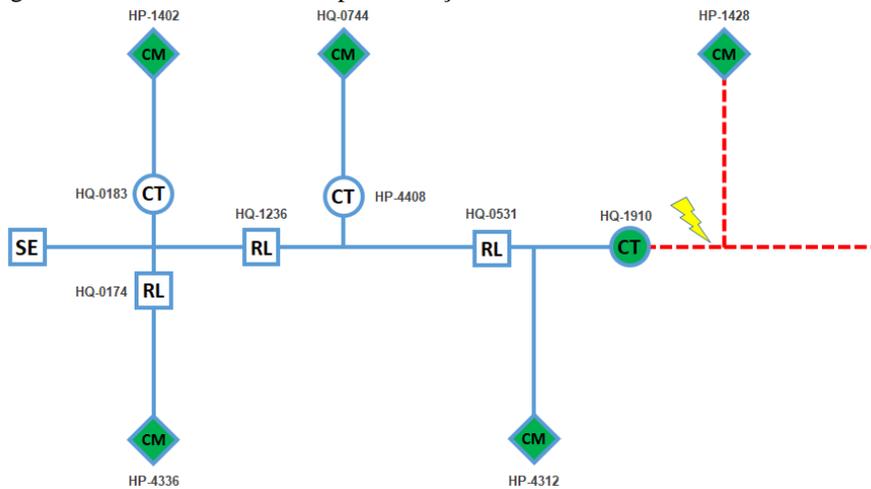
Figura 5.37 – Ocorrência de situação 7



Fonte: Própria

O trecho afetado poderá ser reduzido através da abertura remota da chave automática HQ-1910 e o fechamento do religador HQ-0531, em um tempo inferior a três minutos, afetando 670 clientes, conforme mostrado na Figura 5.38.

Figura 5.38 – Primeira manobra para situação 7



Fonte: Própria

O cálculo do FEC será realizado da seguinte forma:

$$FEC_7 = \frac{670}{4494} = 0,1491 \quad (27)$$

O FEC total para as simulações realizadas na disposição de equipamentos apontados pelo biproduto é obtido abaixo:

$$FEC_{biproduto} = 1,6006 + 0,3465 + 0,0530 + 0,8209 + 0,0774 + 0,6061 + 0,1491 \quad (28)$$

$$FEC_{DMA} = 3,6535 \quad (29)$$

5.5 Comparação entre os valores de FEC para biproduto e DMA

Conforme apresentado nos itens anteriores, os valores do indicador FEC calculados para cada uma das metodologias citadas, através de simulações realizadas no sistema com faltas fictícias, propondo encontrar a quantidade de clientes afetados para cada saída de equipamento de proteção, assim como a quantidade de clientes afetados após realização de recomposição do sistema.

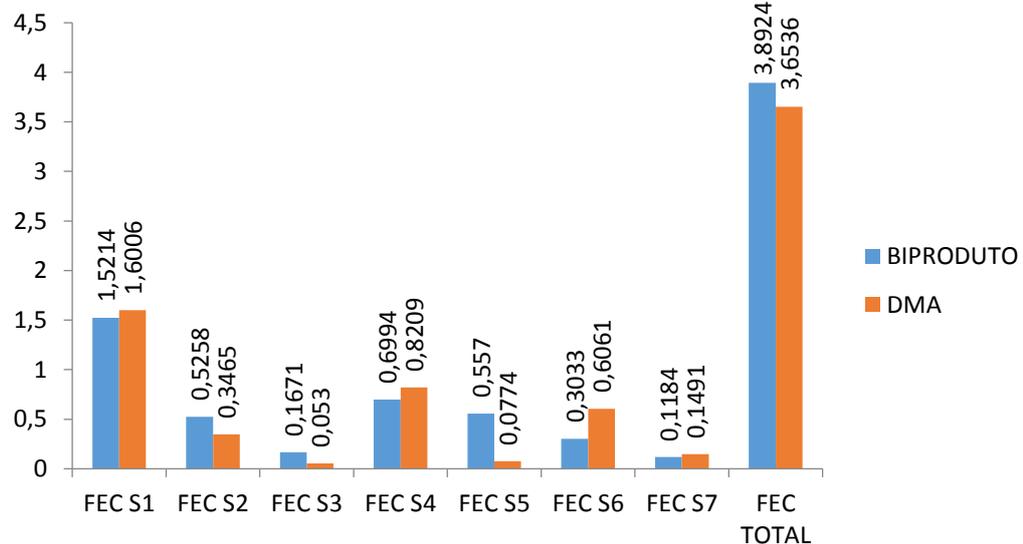
Com os valores totais do FEC para o biproduto e para o DMA, encontrados em (20) e (29) respectivamente, é possível realizar o cálculo do ganho entre o alimentador com disposição de equipamentos obtida através do DMA e, relação ao alimentador com disposição de equipamentos obtidos através do biproduto.

O ganho é calculado de acordo com a equação (30):

$$Ganho = \frac{FEC_{biproduto} - FEC_{DMA}}{FEC_{biproduto}} \cdot 100\% = \frac{3,8923 - 3,6535}{3,8923} \cdot 100\% = 6,1352\% \quad (30)$$

Portanto, através das simulações realizadas com faltas hipotéticas, o alimentador com a disposição de equipamentos apontada pelo método do DMA possui um ganho de 6,1352 % de FEC em relação ao método do biproduto, conforme é mostrado na Figura 5.39, onde o ganho total pode ser observado.

Figura 5.39 – Comparativo entre os resultados obtidos



Fonte: Própria

5.6 Considerações do capítulo

Neste capítulo foi apresentado o critério de posicionamento de dispositivos de proteção e manobra (DPM) utilizado pela concessionária para realização de comparativo entre o posicionamento de DPM proposto pela concessionária e o proposto neste trabalho. Houve a realização de um estudo de caso aplicado em um alimentador, e realizadas simulações para obtenção do valor de FEC para a disposição dos equipamentos em cada método, considerando situações hipotéticas de falha, obtendo-se um ganho deste indicador com a utilização do critério de DMA. No próximo capítulo serão apresentadas as conclusões e trabalhos futuros.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentados os conceitos de metodologia heurística, representação nó-profundidade e critério de desempenho máximo de um alimentador, objetivando o desenvolvimento de uma forma eficaz e eficiente de escolha de alocação para os equipamentos de proteção e manobra.

Através da linguagem de programação Python, foi desenvolvido um algoritmo para realização do cálculo do DMA para todos os pontos de possível alocação de um equipamento, em um determinado alimentador, para determinação de pontos em que o valor de desempenho máximo de um alimentador fosse máximo. Este objetivo foi alcançado de modo que o algoritmo indica pontos eficientes para localização de dispositivos de proteção e manobra, seguindo o critério de DMA.

Comparado aos pontos propostos pela concessionária, os pontos propostos pelo DMA possuem disposição semelhante, havendo na maioria dos casos, pequenas mudanças de posição.

Visando obter uma redução no indicador FEC, foi realizado um comparativo entre a metodologia adotada pela concessionária local, o método biproduto, e a metodologia abordada neste trabalho, o método DMA. Em cada um dos casos, foram realizadas simulações de faltas ao longo de cada alimentador, considerando as reposições automáticas e manuais realizadas por operadores e equipes.

Os resultados obtidos para estas simulações foram satisfatórios, pois houve um ganho de 6,1352 % de FEC do método do DMA em relação ao método biproduto, confirmando a ideia que a metodologia de desempenho máximo de um alimentador é eficiente na escolha de pontos de alocação para equipamentos de proteção e manobra.

Com isto, é possível citar alguns benefícios da escolha de pontos eficientes de instalação utilizando o algoritmo desenvolvido, em relação a metodologia adotada atualmente pela concessionária local, são eles:

1. Velocidade na escolha dos pontos de alocação, promovendo assim uma redução do tempo gasto pelo projetista;
2. Análise de todos os pontos de possível alocação existentes no alimentador, critério este até então não utilizado para a escolha dos pontos de instalação através do biproduto, devido a esta metodologia apresentar uma forma empírica de escolha;

3. Auxílio ao projetista na definição dos pontos de alocação de DPM. Deste modo, o projetista pode utilizar o algoritmo como base e realocar os equipamentos de acordo com conhecimentos em campo;
4. Redução do indicador FEC. A redução deste indicador possui grande importância para a concessionária devido a necessidade que existe em a distribuidora apresentar índices dentro de metas estabelecidas pela ANEEL.

Apesar dos resultados terem sido satisfatórias, ainda existem algumas melhorias a serem realizadas para um melhor desenvolvimento do algoritmo, visando a redução do indicador FEC. São elas:

1. Determinar pontos de instalação de dispositivos de proteção e manobra em alimentadores que já possuam equipamentos instalados;
2. Considerar na realização do cálculo do DMA um peso maior para a quantidade de equipamentos protegidos, em relação a distância à jusante do equipamento;
3. Analisar os pontos de instalação dos DPM de forma que seja considerada a recomposição de cargas ao longo do alimentador;
4. Considerar o indicador FEC no cálculo de DMA;
5. Consideração das características de cada equipamento a ser instalado;
6. Considerar o estudo de coordenação das proteções a serem instaladas.

REFERÊNCIAS

Adolpho. (2016). *Equipamentos de proteção e manobra*. Acesso em 21 set. 2017. Disponível em [sabereletrica.com.br: https://www.sabereletrica.com.br/equipamentos-de-protecao-e-manobra/](https://www.sabereletrica.com.br/equipamentos-de-protecao-e-manobra/)

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Prodist (Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional). Módulo 8: qualidade da Energia Elétrica**, 2010. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/modulo-8>. Acesso em 21 set. 2017.

ALMEIDA, M. A. D. **Apostila Proteção de Sistemas Elétricos**. 2000. Natal, 2000.

ALVES, Michel. (2009). *A proteção da rede de distribuição contra sobrecorrentes*. Acesso em 25 set. 2017. Disponível em [ebah.com.br: http://www.ebah.com.br/content/ABAAAgOpMAK/a-protecao-rede-distribuicao-contrasobrecorrentes?part=3](http://www.ebah.com.br/content/ABAAAgOpMAK/a-protecao-rede-distribuicao-contrasobrecorrentes?part=3)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6835: informação e documentação: citações em documentos**. Rio de Janeiro, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8177: informação e documentação: citações em documentos**. Rio de Janeiro, 1983.

Balestro. (2014). *Porta fusível para chave de distribuição base C*. Acesso em 25 set. 2017. Disponível em [balestro.com.br: http://www.balestro.com.br/chave-fusivel-porta-fusivel/](http://www.balestro.com.br/chave-fusivel-porta-fusivel/)

CRISMEG. (2014). *Elo fusível*. Acesso em 25 set. 2017. Disponível em [crismeg.com.br: http://www.crismeg.com.br/elo-fusivel/](http://www.crismeg.com.br/elo-fusivel/)

DELMAR. (2014). *Elo fusível*. Acesso em 25 set. 2017. Disponível em [delmar.com.br: http://www.delmar.com.br/rd.asp](http://www.delmar.com.br/rd.asp)

GERADORA, A. (2017). *Como a energia elétrica chega até a sua casa*. Acesso em 21 set. 2017. Disponível em [ageradora.com.br: https://www.ageradora.com.br/como-a-energia-eletrica-chega-ate-sua-casa/](https://www.ageradora.com.br/como-a-energia-eletrica-chega-ate-sua-casa/)

GSIGMA. (2017). *Árvore de Busca*. Acesso em 30 set. 2017. Disponível em [gsigma.com.br: http://www.gsigma.ufsc.br/edu.html](http://www.gsigma.ufsc.br/edu.html)

ISOLADORES, Stieletrônica. (2016). *Chave fusível de força tipo FF*. Acesso em 25 set. 2017. Disponível em [stieletronicaisoladores.com.br: http://www.stieletronicaisoladores.com.br/ff](http://www.stieletronicaisoladores.com.br/ff)

JOSEN, Edson. (2017). *Introdução a proteção, distribuição, fusíveis, trafos e alimentadores*. Acesso em 21 set. 2017. Disponível em [passeidireto.com: http://edsonjosen.dominiotemporario.com/doc/Introducao_Protecao_Distribuicao_-_Fusiveis_Trafos_e_Alimentadores.pdf](http://edsonjosen.dominiotemporario.com/doc/Introducao_Protecao_Distribuicao_-_Fusiveis_Trafos_e_Alimentadores.pdf)

KAGAN, N.; OLIVEIRA, C.C. B.; ROBBA, E. J. **Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica**. 2 ed. rev. São Paulo: Blucher, 2010.

KINDERMANN, G. **Proteções de sistemas elétricos de potência**. Volume 1, Florianópolis: 3ª Edição, 2012.

LEÃO, R. P. S. **Apostila Distribuição de Energia Elétrica, 2014**. Fortaleza, 2014.

MACESO, Humberto. (2013). *Distribuição de Energia Elétrica*. Acesso em 20 nov. 2017. Disponível em ebah.com.br: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAft4IAK/banco-capacitores-religadores?part=4>

MAIA, Marcelo. **Metodologia de alocação otimizada de dispositivos de proteção em alimentadores baseada em metodologia heurística**. 2013. CLAGTEE, 2013.

MAIA, Marcelo. **Alocação de dispositivos de proteção em redes de distribuição primária de energia**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

MAMEDE FILHO, J.; MAMEDE D. R. **Manual de Equipamentos Elétricos**. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

MARQUES, L. T. **Restabelecimento de energia por reconfiguração de redes em sistemas de distribuição de grande porte com priorização de chaves, consumidores e definição de sequência de chaveamento**. 2013. Dissertação (Dissertação) – Departamento de Engenharia Elétrica e Computação da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – USP, 2013.

MELO, Lucas. **Desenvolvimento de uma plataforma para implementação de sistemas multiagentes com aplicação para recomposição automática de sistemas de distribuição de energia elétrica**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

NOJA POWER. (2017). *Religador Noja Power*. Acesso em 25 set. 2017. Disponível em nojapower.com.br: <https://www.nojapower.com.br/>

APÊNDICE A – BANCO DE DADOS AL PCJ01P4

TOMBAMENTO	NÓ	PROF	CLIENTES	DIST	VIZINHO 1	VIZINHO 2	VIZINHO 3	VIZINHO 4
SE	0	0	0	0	1			
SHQ0000	1	1	0	0,03	0	2		
SHP4313	2	2	0	0,612	1	3		
SHQ2232	3	3	0	0,06	2	4		
DERIVAÇÃO 1	4	4	0	0,348	3	5	7	
FHQ0140	5	5	0	0,001	4	6		
THQ0159	6	6	142	0,02	5			
DERIVAÇÃO 2	7	5	0	0,05	4	8	10	
FHP4321	8	6	0	0,001	7	9		
THP4322	9	7	1	0,03	8			
DERIVAÇÃO 3	10	6	0	0,06	7	11	16	
FHP1438	11	7	0	0,001	10	12		
DERIVAÇÃO 4	12	8	0	0,04	11	13	14	
THP4345	13	9	8	0,02	12			
FHP1439	14	9	0	0,001	12	15		
THP1439	15	10	1	0,001	14			
SHP1401	16	7	0	0,02	10	17		
DERIVAÇÃO 5	17	8	0	0,04	16	18	55	67
SHQ0174	18	9	0	0,04	17	19		
THP4305	19	10	23	0,04	18	20		
DERIVAÇÃO 6	20	11	0	0,07	19	21	26	45
FHQ2208	21	12	0	0,005	20	22		
DERIVAÇÃO 7	22	13	0	0,001	21	23	24	
THQ2216	23	14	106	0,03	22			
FHQ1112	24	14	0	0,001	22	25		
THP1112	25	15	1	0,001	24			
DERIVAÇÃO 8	26	12	0	0,12	20	27	29	31
FHQ1848	27	13	0	0,001	26	28		
THQ1856	28	14	91	0,02	27			
SHQ0396	29	13	0	0,001	26	30		
THQ0400	30	14	1	0,01	29			
SHQ0418	31	13	0	0,26	26	32		
THQ1082	32	14	230	0,03	31	33		
DERIVAÇÃO 9	33	15	0	0,12	32	34	36	
FHQ0434	34	16	0	0,001	33	35		
THQ0426	35	17	137	0,04	34			
DERIVAÇÃO 10	36	16	0	0,1	33	37	39	
FHP4311	37	17	0	0,02	36	38		
THP4310	38	18	125	0,14	37			
SHQ0442	39	17	0	0,02	36	40		
DERIVAÇÃO 11	40	18	0	0,21	39	41	43	
FHQ1104	41	19	0	0,001	40	42		

THQ0450	42	20	280	0,004	41			
THQ1112	43	19	346	0,14	40	44		
SHP4336	44	20	0	0,13	43			
SHQ0345	45	12	0	0,001	20	46		
DERIVAÇÃO 12	46	13	0	0,03	45	47	49	
FHQ0353	47	14	0	0,001	46	48		
THQ0361	48	15	0	0,01	47			
DERIVAÇÃO 13	49	14	0	0,02	46	50	52	
FHQ1821	50	15	0	0,001	49	51		
THQ1830	51	16	35	0,01	50			
THQ0370	52	15	181	0,02	49	53		
FHQ2194	53	16	0	0,03	52	54		
THQ2136	54	17	1	0,06	53			
SHQ0183	55	9	0	0,08	17	56		
DERIVAÇÃO 14	56	10	0	0,02	55	57	59	
FHP4401	57	11	0	0,001	56	58		
THQ0205	58	12	166	0,04	57			
DERIVAÇÃO 15	59	11	0	0,05	56	60	62	
FHQ1171	60	12	0	0,04	59	61		
THQ1171	61	13	0	0,01	60			
FHP4403	62	12	0	0,001	59	63		
DERIVAÇÃO 16	63	13	0	0,04	62	64	65	
THP0496	64	14	71	0,04	63			
FHP1648	65	14	0	0,001	63	66		
THP1648	66	15	1	0,001	65			
SHQ1813	67	9	0	0,04	17	68		
DERIVAÇÃO 17	68	10	0	0,04	67	69	71	
FHP4319	69	11	0	0,001	68	70		
THP4319	70	12	1	0,01	69			
DERIVAÇÃO 18	71	11	0	0,04	68	72	73	
THQ1244	72	12	69	0,03	71			
FHQ1236	73	12	0	0,01	71	74		
DERIVAÇÃO 19	74	13	0	0,09	73	75	98	
THP4408	75	14	102	0,02	74	76		
DERIVAÇÃO 20	76	15	0	0,11	75	77	86	
DERIVAÇÃO 21	77	16	0	0,14	76	78	80	
FHQ0663	78	17	0	0,001	77	79		
THQ0671	79	18	38	0,03	78			
THP0003	80	17	53	0,49	77	81		
DERIVAÇÃO 22	81	18	0	0,05	80	82	84	
FHQ0680	82	19	0	0,001	81	83		
THQ0698	83	20	36	0,02	82			
FHQ0710	84	19	0	0,11	81	85		
THQ0710	85	20	1	0,1	84			
FHQ0647	86	16	0	0,02	76	87		

DERIVAÇÃO 23	87	17	0	0,08	86	88	90	
FHQ1570	88	18	0	0,08	87	89		
THQ1570	89	19	1	0,001	88			
THQ0655	90	18	178	0,04	87	91		
DERIVAÇÃO 24	91	19	0	0,001	90	92	94	
FHP0940	92	20	0	0,001	91	93		
THP0939	93	21	1	0,02	92			
DERIVAÇÃO 25	94	20	0	0,08	91	95	96	
THP4343	95	21	40	0,07	94			
FHP4324	96	22	0	0,07	94	97		
THP4324	97	23	0	0,01	96			
SHQ0523	98	14	0	0,001	74	99		
THP0044	99	15	70	0,09	98	100		
THP0232	100	16	15	0,11	99	101		
SHP4406	101	17	0	0,07	100	102		
THQ0531	102	18	245	0,13	101	103		
FHQ1899	103	19	0	0,186	102	104		
DERIVAÇÃO 26	104	20	0	0,21	103	105	107	
FHP0548	105	21	0	0,001	104	106		
THP0567	106	22	17	0,1	105			
THQ1902	107	21	317	0,11	104	108		
DERIVAÇÃO 27	108	22	0	0,04	107	109	111	
FHQ2275	109	23	0	0,001	108	110		
THQ2283	110	24	135	0,3	109			
THQ2213	111	23	68	0,18	108	112		
DERIVAÇÃO 28	112	24	0	0,04	111	113	115	
FHQ2291	113	25	0	0,001	112	114		
THQ2305	114	26	295	0,22	113			
THQ1910	115	25	195	0,11	112	116		
DERIVAÇÃO 29	116	26	0	0,11	115	117	128	
FHP0550	117	27	0	0,02	116	118		
DERIVAÇÃO 30	118	28	0	0,01	117	119	120	
THP0573	119	29	6	0,04	118			
DERIVAÇÃO 31	120	29	0	0,03	118	121	122	123
THP0572	121	30	39	0,1	120			
THP0571	122	30	14	0,03	120			
DERIVAÇÃO 32	123	30	0	0,06	120	124	125	126
THP0570	124	31	19	0,06	123			
THP0569	125	31	19	0,02	123			
THP0568	126	31	26	0,02	123	127		
THP1631	127	32	15	0,09	126			
FHP0549	128	27	0	0,02	116	129		
THP0574	129	28	48	0,24	128	130		
DERIVAÇÃO 33	130	29	0	0,1	129	131	147	
THP0575	131	30	46	0,06	130	132		

DERIVAÇÃO 34	132	31	0	0,1	131	133	134	
THP0576	133	32	15	0,09	132			
DERIVAÇÃO 35	134	32	0	0,03	132	135	136	
THP0577	135	33	12	0,1	134			
DERIVAÇÃO 36	136	33	0	0,04	134	137	138	140
THP0578	137	34	15	0,11	136			
THP0582	138	34	18	0,06	136	139		
THP0583	139	35	12	0,11	138			
DERIVAÇÃO 37	140	34	0	0,05	136	141	142	145
THP0581	141	35	7	0,04	140			
DERIVAÇÃO 38	142	35	0	0,08	140	143	144	
THP0580	143	36	9	0,06	142			
THP0579	144	36	10	0,03	142			
FHP1188	145	35	0	0,001	140	146		
THP1187	146	36	4	0,02	145			
DERIVAÇÃO 39	147	30	0	0,16	130	148	149	
THP0584	148	31	17	0,13	147			
DERIVAÇÃO 40	149	31	0	0,03	147	150	151	
THP0586	150	32	10	0,1	149			
THP0585	151	32	4	0,02	149	152		
DERIVAÇÃO 41	152	33	0	0,02	151	153	154	
THP0587	153	34	5	0,05	152			
DERIVAÇÃO 42	154	34	0	0,06	152	155	156	
THP0588	155	35	24	0,03	154			
DERIVAÇÃO 43	156	35	0	0,04	154	157	158	
THP0589	157	36	258	0,02	156			
THP0590	158	36	7	0,08	156	159		
THP0591	159	37	11	0,14	158			

APÊNDICE B – ALGORITMO DESENVOLVIDO NO PYTHON PARA EFICIENTIZAÇÃO DOS PONTOS DE INSTALAÇÃO DE DPM

```
from mygrid.rnp import Arvore
import numpy as np
from copy import deepcopy
from dados import carregar_dados

def encontrar_nos_jusante(rede, no):
    vizinhos = rede.arvore[no]
    rnp_dict = rede.rnp_dic()
    prof_no = int(rnp_dict[no])
    nos_jusante = list()
    for i in vizinhos:
        prof_vizinho = int(rnp_dict[i])
        if prof_vizinho > prof_no:
            nos_jusante.append(i)
    return nos_jusante

# definicao da topologia da rede
dados = carregar_dados('PCJ01P4.xlsx')

r = dict()
d = dict()
for i in dados:
    r[i['nome']] = i['vizinhos']
    d[i['nome']] = [int(i['clientes']), float(i['distancia'])]
rede = Arvore(r, dtype=str)
rede.ordenar(raiz='0')

# calculo do comprimento total e do numero de clientes total
total_consumidores = sum([i[0] for i in d.values()])
total_distancia = sum([i[1] for i in d.values()])
```



```

# definicao do numero de equipamentos de protecao a serem implantados
nprotec = 6
pontos_de_alocacao = list()

# percorre a quantidade de dispositivos de protecao
for k in range(nprotec):
    print '-----\nAlocacao do dispositivo {k}\n-----'.format(k=k)
    dma = list()

# percorre cada um dos nos do sistema para calculo do dma
for i in np.transpose(rede.rnp[:, 1:]):
    no = i[1]
    prof = i[0]
    r = deepcopy(rede)
    cam_min = len(rede.rnp_dic())
    no_min = '0'

# percorre os nos que ja tem protecao associada se houverem e poda os ramos que
# ja estao protegidos ao mesmo tempo que verifica qual o dispositivo de protecao
# mais proximo a montante
for l in pontos_de_alocacao:

    prof = int(rede.rnp_dic()[l])
    prof_ = int(rede.rnp_dic()[no])
    # se profundidade atual for maior que a profundidade da chave analisada e a
    # chave pertence a arvore r, poda a arvore r no ponto da chave analisada
    caminho1 = rede.caminho_no_para_raiz(l)
    caminho2 = rede.caminho_no_para_raiz(no)
    caminho3 = rede.caminho_no_para_no(no, l)
    if prof > prof_ and no in caminho1[1, :]:
        nos_jusante = encontrar_nos_jusante(rede, l)
        for u in nos_jusante:

```

```

try:
    r.podar(u, alterar_rnp=True)
except Exception as e:
    pass

# se nao, se a profundidade da chave analisada for menor que a profundidade
# do no atual e prof do no atual menor que a profundidade mínima atualiza
# profundidade minima e no da profundidade minima
elif prof < prof_ and l in caminho2[1, :] and cam_min > np.shape(caminho3)[1]:
    cam_min = prof
    no_min = l

#-----
# calcula numero de consumidores a montante ate chave mais proxima
#-----

# 1 - Poda arvore a jusante do no considerado
r2 = deepcopy(rede)
nos_jusante = encontrar_nos_jusante(rede, no)
for u in nos_jusante:
    r2.podar(u, alterar_rnp=True)

# 2 - Poda arvore a jusante do no com protecao mais proximo do atual
poda = r2.podar(no_min, alterar_rnp=True)
consumidores = 0
rnp = poda[0]
for l in np.transpose(rnp):
    prof_, no_ = l
    if no_ != no_min:
        c, dt = d[no_]
        consumidores += c

#-----

```

```

# calcula distancia a junsante ate chave mais proxima
#-----
poda = r.podar(no, alterar_rnp=True)
rnp = poda[0]
distancia = 0
# percorre os nos podados do sistema
for j in np.transpose(rnp):
    prof_, no_ = j
    if no_ != no:
        c, dt = d[no_]
        distancia += dt

#-----

# calcula o dma para o no i
#-----
dma.append([consumidores,
            distancia,
            consumidores * distancia])
print 'dma no {i} => {c} * {d} = {dma}'.format(i=no,c=consumidores, d=distancia,
dma=consumidores*distancia)

# zera dma dos pontos que ja tem chave alocada
for i in pontos_de_alocacao:
    dma[int(i)-1] = [0.0, 0.0, 0.0]

#-----

# encontra o maximo dma para alocao do dispositivo de protecao
#-----
max_dma = 0
p = None
for i, j in enumerate(dma):
    if j[2] > max_dma:
        p = i + 1

```

```
max_dma = j[2]

print '===\nNo escolhido para alocao => {p} '.format(p=p)
pontos_de_alocacao.append(str(p))
```

APÊNDICE C – ALIMENTADOR EM REPRESENTAÇÃO DE GRAFO EM NÓ-PROFUNDIDADE

