

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ROGER SAMUEL ZULPO

PROJETO DE DIPLOMAÇÃO

**OTIMIZAÇÃO E COORDENAÇÃO DA PROTEÇÃO DE
SISTEMAS ELÉTRICOS DE DISTRIBUIÇÃO**

Porto Alegre

2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**OTIMIZAÇÃO E COORDENAÇÃO DA PROTEÇÃO DE
SISTEMAS ELÉTRICOS DE DISTRIBUIÇÃO**

Projeto de Diplomação apresentado ao
Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade
Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos
para Graduação em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Arturo Suman Bretas

CO-ORIENTADOR: Me. Gustavo Dorneles Ferreira

Porto Alegre

2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

RÓGER SAMUEL ZULPO

OTIMIZAÇÃO E COORDENAÇÃO DA PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE DISTRIBUIÇÃO

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina de “Projeto de Diplomação”, do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: Prof. Dr. Arturo Suman Bretas, UFRGS
Doutor pela Virginia Polytechnic Institute and State University
- Blacksburg, Estados Unidos da América

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne, UFRGS
Doutor pela Chalmers University of Technology – Gothenburg, Suécia

Me. Gustavo Dorneles Ferreira, UFRGS
Mestre pela Universidade Federal de Santa Maria – Santa Maria, Brasil

Porto Alegre, Julho de 2012.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, César e Dilse, em especial pela dedicação e apoio em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

A minha namorada, Karine Caetano, aos colegas e amigos pela dedicação, motivação e apoio nas horas difíceis, e pelas risadas nos momentos de descontração.

Aos bons professores do Departamento de Engenharia Elétrica, que conseguem obter um excelente desempenho do aluno, mantendo uma relação saudável.

Ao professor Dr. Arturo Bretas e ao Me. Gustavo Ferreira pela orientação no desenvolvimento deste trabalho.

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul pela disponibilização da estrutura e dos serviços.

RESUMO

Este projeto foi desenvolvido com o objetivo de otimizar a alocação e coordenar as proteções de um alimentador de distribuição de energia elétrica. Para isto, é necessário o levantamento dos dados deste sistema, como a topologia, número de consumidores com sua respectiva disposição ao longo dos trechos, assim como o ordenamento das cargas e das taxas de falha temporária e permanente. Com estas informações, um modelo de programação não linear binária é gerado através do MATLAB. Este modelo compreende a função objetivo definida pelo indicador de confiabilidade SAIFI (System Average Interruption Frequency) e uma série de restrições. A resolução deste modelo resulta nas localizações otimizadas dos dispositivos de proteção. Como o método de solução do modelo, o algoritmo BARON é utilizado neste trabalho. Dadas as posições de cada dispositivo de proteção, o sistema é inserido no SKM Power Tools, onde são realizadas as análises de fluxo de potência e curto-circuito. A etapa final do projeto consiste na coordenação de todos os elementos de proteção, de forma que o resultado é um sistema otimizado e devidamente protegido por relés, religadores e fusíveis.

Palavras-chaves: Engenharia Elétrica. Sistemas de Potência. Otimização. Proteção. Coordenação.

ABSTRACT

This project was developed in order to optimize the allocation and coordinate the protection of a power distribution feeder. For this, it is necessary to gather data of the system, such as topology, number of customers and their respective position in the sections, as well as the ordering of loads and the temporary and permanent failure rates. With this information, a nonlinear binary programming model is generated using the MATLAB. This model includes the objective function defined by the reliability indicator SAIFI (System Average Interruption Frequency) and a series of restrictions. The resolution of this model results in the optimal locations of the protective devices. As the method for solving the model, the BARON algorithm is used in this project. Given the positions of each protection device, the system is inserted into the SKM Power Tools, where power flow and short-circuit analysis are performed. The final stage of the project consists in coordinating all the protection elements, so that the result is a system optimized and properly protected by relays, reclosers and fuses.

Keywords: Electrical Engineering. Power Systems. Optimization. Protection. Coordination.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	13
3 REVISÃO INICIAL.....	14
3.1 DIAGRAMA UNIFILAR	14
3.2 SISTEMA PU.....	15
3.2.1 VALORES BASE EM SISTEMAS ELÉTRICOS TRIFÁSICOS.....	15
3.2.2. MUDANÇA DE BASE DE UMA IMPEDÂNCIA.....	16
3.3 TEOREMA DE FORTESCUE.....	17
3.3.1 ESTUDO MATEMÁTICO	18
3.3.2 CORRENTE DE SEQUÊNCIA ZERO.....	19
3.4 IMPEDÂNCIAS DE SEQUÊNCIA	20
3.4.1 TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DA SUBESTAÇÃO.....	21
3.4.1.1 <i>Ligação Δ-Δ</i>	22
3.4.1.2 <i>Ligação Δ-$Y_{ATERRADO}$</i>	22
3.4.2 REDE DE DISTRIBUIÇÃO	22
3.4.2.1 <i>Sequência Positiva e Negativa</i>	23
3.4.2.1. <i>Sequência Zero</i>	24
3.5 CURTO-CIRCUITO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO RADIAL.....	25
3.5.1. TRIFÁSICO (FFF)	25
3.5.2. BIFÁSICO (FF)	26
3.5.3. MONOFÁSICO (FT)	28
3.5.3.1 <i>Monofásico Mínimo ($FT+Z_d$)</i>	29

4 COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE	31
4.1 RELÉ E DISJUNTOR	31
4.2 RELIGADOR.....	31
4.3 FUSÍVEL	31
4.4 COORDENAÇÃO ENTRE RELÉS.....	32
4.5 COORDENAÇÃO ENTRE FUSÍVEIS.....	35
4.6 COORDENAÇÃO ENTRE RELÉ E FUSÍVEL	36
4.7 COORDENAÇÃO ENTRE RELÉ E RELIGADOR.....	36
4.8 COORDENAÇÃO ENTRE RELIGADOR E FUSÍVEL.....	36
5 ALOCAÇÃO OTIMIZADA DOS DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO.....	38
5.1 ÍNDICADORES DE CONFIABILIDADE.....	38
5.1.1 ÍNDICE SAIFI	39
5.2 ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO.....	39
5.3 MODELO PARA ALOCAÇÃO OTIMIZADA DE DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO.....	39
5.3.1 FUNÇÃO OBJETIVO	41
5.3.2 VARIÁVEIS DE DECISÃO.....	42
5.3.3 RESTRIÇÕES DO PROBLEMA	42
6 METODOLOGIA DESENVOLVIDA	44
6.1 SISTEMA UTILIZADO	44
6.2 GERAÇÃO DO MODELO DE OTIMIZAÇÃO.....	45
6.3 SIMULAÇÃO	48
6.4 AJUSTES DA PROTEÇÃO	51
6.4.1 AJUSTE DOS RELIGADORES PD-0031 E PD-0023	51

6.4.2 AJUSTE DO RELÉ DA SUBESTAÇÃO	52
6.5 COORDENOGRAMAS	53
6.5.1 RELIGADOR PD-0023 E ELEMENTOS DE PROTEÇÃO A JUSANTE	54
6.5.2 RELIGADOR PD-0031 E ELEMENTOS DE PROTEÇÃO A JUSANTE	55
6.5.2 RELÉ PD-0001 SUBES, FUSÍVEIS E RELIGADORES	56
CONCLUSÕES.....	57
REFERÊNCIAS.....	58
APÊNDICE 1 – ROTINA DA FUNÇÃO OBJETIVO E RESTRIÇÕES	60
APÊNDICE 2 – FUNÇÕES AUXILIARES	62
APÊNDICE 3 – ROTINA DE EXPORTAÇÃO PARA O FORMATO GAMS	63
APÊNDICE 4 – RESPOSTA DO SERVIDOR DE OTIMIZAÇÃO	64
APÊNDICE 5 – DIAGRAMA UNIFILAR.....	69
ANEXO 1 – FUNÇÕES AUXILIARES	70
ANEXO 2 – DADOS DO SISTEMA	71

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - DIAGRAMA UNIFILAR.....	14
FIGURA 2 - SISTEMA DE BASES	16
FIGURA 3 - COMPONENTES DE SEQUÊNCIA.....	17
FIGURA 4 - CARGA CONECTADA EM Y COM NEUTRO	19
FIGURA 5 - CARGAS CONECTADAS SEM NEUTRO	20
FIGURA 6 – DISTRIBUIÇÃO RADIAL.....	21
FIGURA 7 – CIRCUITO PARA FALTA BIFÁSICA	27
FIGURA 8 – CIRCUITO PARA FALTA MONOFÁSICA	28
FIGURA 9 - CIRCUITO PARA FALTA MONOFÁSICA MÍNIMA	29
FIGURA 10 – TRANSFORMAÇÕES DE CORRENTE.....	32
FIGURA 11 – TIME DIAL.....	34
FIGURA 12 – ALIMENTADOR DIVIDIDO EM SEÇÕES	40
FIGURA 13 – TOPOLOGIA DO CONJUNTO C_{ij}	41
FIGURA 14 – SISTEMA TRIFÁSICO BASE	45
FIGURA 15 – PARTE DA MATRIZ TOPOLOGIA	46
FIGURA 16 – PARTE DO SCRIPT QUE GERA A FUNÇÃO OBJETIVO.....	47
FIGURA 17 – TELA DE AJUSTE DO ESTUDO (SKM POWER TOOLS)	49

FIGURA 18 – UNIFILAR COM DATABLOCKS E COMPONENTES	50
FIGURA 19 – RELIGADORES PD-0023 E PD-0031.....	52
FIGURA 20 – RELÉ PD-0001 SUBES.....	53
FIGURA 21 – PD-0023 E PD-0024	54
FIGURA 22 – PD-0031 E FUSÍVEIS A JUSANTE.....	55
FIGURA 23 – RELÉ, RELIGADORES E FUSÍVEIS.....	56

1 INTRODUÇÃO

O projeto otimizado de sistemas de proteção vem sendo estudado e desenvolvido, de forma que começa a ganhar espaço nas concessionárias de energia elétrica do Brasil e do mundo devido aos benefícios concretos que pode trazer, tanto para a empresa responsável pela distribuição, como para o cliente que recebe um serviço de melhor qualidade. Com o intuito de mensurar quantitativamente a confiabilidade, são utilizados pelas agências reguladoras, indicadores como o SAIFI (System Average Interruption Frequency Index), conhecido no Brasil como FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora). Em relação a este índice em específico, pode-se afirmar que uma diminuição no valor desta grandeza acarreta, na média, um menor número de interrupções por consumidor. Para que ocorra este aumento na qualidade do serviço prestado, umas das abordagens possíveis é o remanejamento de equipamentos de proteção através de algoritmos de otimização, que é o foco deste projeto. Mas somente isto não é o suficiente, já que se esta proteção sofre uma mudança na sua localização, os ajustes anteriores não têm mais utilidade, de forma que novas configurações terão que ser implementadas. É neste momento que se faz necessário o estudo da coordenação dos elementos de proteção, que podem ser relés, religadores, fusíveis e outros. Estes dispositivos precisam atuar dentro de certos limites de tempo e corrente, de modo que exista a possibilidade das faltas temporárias se extinguirem por si só e que no caso de faltas permanentes, apenas a menor seção do alimentador seja desligada.

O objetivo deste projeto é aplicar estes dois conceitos a um alimentador, de modo que o resultado final é um sistema de distribuição com os dispositivos de proteção alocados em suas posições ótimas e devidamente coordenados entre si. Alcançados estes objetivos, haverá um aumento na satisfação do consumidor com a prestação de um serviço de melhor qualidade.

2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No capítulo 3 são apresentados os conceitos pertinentes quanto a sistemas de potência, impedâncias de sequência e análise de curto-circuito. Já no capítulo 4, são expostas as considerações referentes à coordenação de elementos de proteção comuns em redes de distribuição como relés, religadores e fusíveis.

No capítulo 5 é apresentada uma descrição inicial sobre indicadores de confiabilidade, onde, daqueles, é destacado o índice SAIFI. Em seguida propõe-se um modelo de otimização, que é baseado em programação não linear binária, onde é gerada uma função objetivo que deve ser minimizada, observando-se uma série de restrições.

No capítulo 6 do desenvolvimento do trabalho, considerando um sistema teste, são aplicadas as técnicas descritas nos itens anteriores. A primeira etapa consiste na geração do modelo de programação através do MATLAB e uso de ferramentas “online” para sua resolução, deste modo obtêm-se as localizações de cada elemento de proteção. A seguir utiliza-se o SKM Power Tools, em conjunto com as ideias do capítulo 4, para que estes dispositivos atuem de forma coordenada, e que o sistema de distribuição opere de forma otimizada e protegida.

3 REVISÃO INICIAL

3.1 DIAGRAMA UNIFILAR

O diagrama unifilar para sistemas de potência é uma forma de representação do circuito elétrico, geralmente trifásico, onde a rede é substituída por uma única linha e cada componente relevante do sistema, como transformadores de força ou distribuição, cargas, elementos de proteção, geradores e barras são representados através de seus respectivos símbolos.

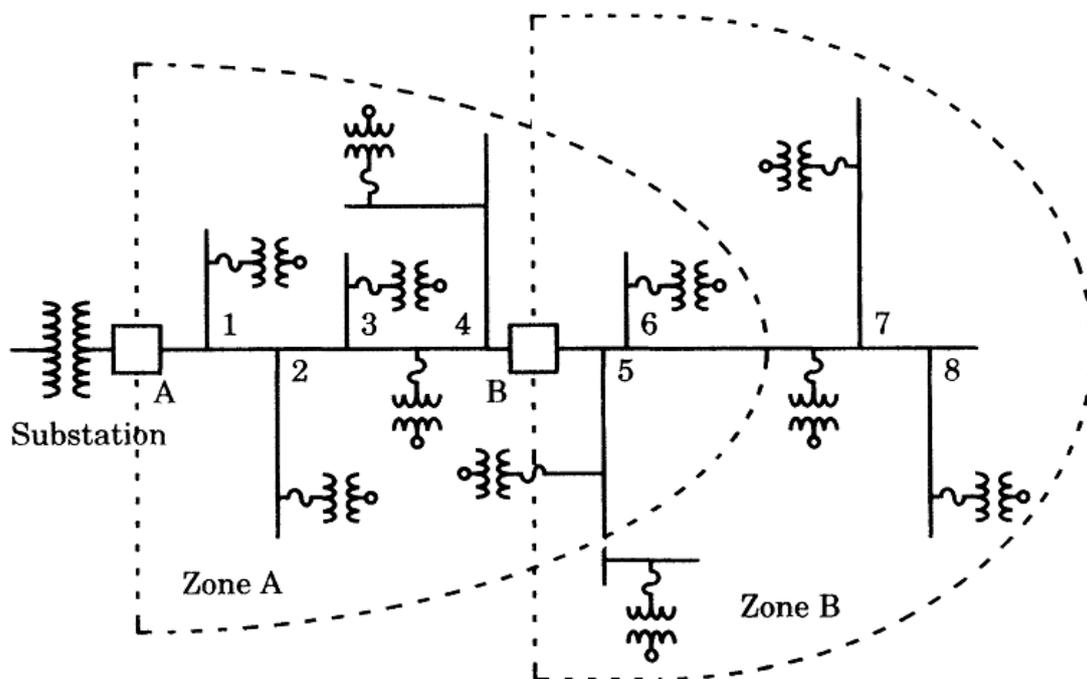


Figura 1 - Diagrama unifilar

Fonte: [1]

A montagem do diagrama unifilar pode ser feita de diversas formas, no exemplo da Figura 1, está enfatizada a zona de proteção dos elementos A e B, também é possível mostrar as correntes de curto-circuito máxima e mínima em cada parte do diagrama, assim como as correntes no circuito principal e nas suas derivações, ou ainda os fluxos de potência ativa e reativa em cada trecho, de forma que o diagrama unifilar pode ser montado de acordo com as características de cada estudo para que seja possível uma melhor organização do trabalho.

3.2 SISTEMA PU

O sistema por unidade é largamente utilizado na análise e projeto de sistemas de potência, uma vez que tende a facilitar o estudo por meio de simplificações. Um caso especial é o estudo do transformador, que pode ser representado em um diagrama unifilar na forma de uma simples impedância e tem sua relação de transformação modificada para 1:1 (um para um), além disso, a tensão de falta é tomada por aproximadamente um pu, independente do nível de tensão, assim como qualquer impedância (Z) no sistema, uma vez que o Z_B (impedância base) também é modificado de modo que a relação seja sempre a mesma. A definição matemática de valor por unidade é apresentada na equação 3.1.

$$\text{Valor por unidade} = \frac{\text{Valor real da grandeza}}{\text{Valor base da grandeza}} \quad (3.1)$$

3.2.1 Valores Base em Sistemas Elétricos Trifásicos

A grande aplicação do sistema por unidade reside em sistemas elétricos trifásicos, de forma que definidas as bases de um sistema, podemos transformar os valores reais em valores “pu”. Usualmente são definidas como bases primárias a potência aparente (S_B) e a tensão de linha (V_B) e as bases secundárias são calculadas em função destas, da seguinte forma:

- a) Definição da potência aparente base (S_B);
- b) Definição da tensão de linha base (V_B);
- c) Cálculo da impedância de base (Z_B);

$$Z_B = \frac{V_B^2}{S_B} \quad (3.3)$$

- d) Cálculo da corrente de base (I_B).

$$I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3} * V_B} \quad (3.3)$$

Definidas as bases das grandezas elétricas de interesse, pode-se representar o sistema composto por estas através de um circuito trifásico ligado em estrela, conforme a Figura 2.

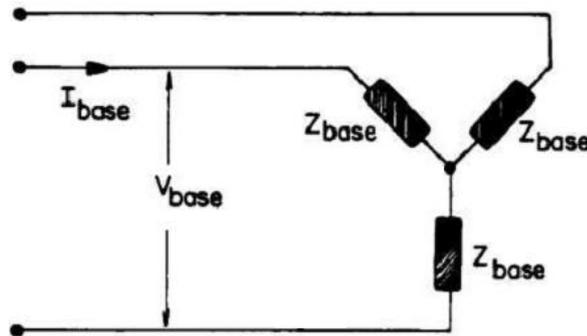


Figura 2 - Sistema de bases

Fonte: [5]

3.2.2. Mudança de Base de uma Impedância

Por muitas vezes existe o interesse de mudar a base de uma impedância para que esta esteja em conformismo com o resto do sistema representado em um conjunto de bases diferentes. Esta situação pode ocorrer no caso de um transformador trifásico, que tem sua impedância (em pu) definida em função de sua potência aparente e tensão de linha nominal, neste caso as bases do sistema podem ser outras e uma mudança de base se faz necessária. Portanto utiliza-se a conversão de uma dada base “1” (Z_{B1}) para a base “2” (Z_{B2}), conforme a equação 3.8. [7]

$$Z_{REAL} = Z_{REAL} \quad (3.4)$$

$$Z_{PU1} * Z_{B1} = Z_{PU2} * Z_{B2} \quad (3.5)$$

$$Z_{PU2} = \frac{Z_{PU1} * Z_{B1}}{Z_{B2}} \quad (3.6)$$

$$Z_{PU2} = Z_{PU1} * \left(\frac{V_{B1}^2}{S_{B1}} \right) / \left(\frac{V_{B2}^2}{S_{B2}} \right) \quad (3.7)$$

$$Z_{PU2} = Z_{PU1} * \frac{S_{B2}}{S_{B1}} * \left(\frac{V_{B1}}{V_{B2}} \right)^2 \quad (3.8)$$

Deste modo existe a conversão da impedância referenciada na base “1” para a base “2”. Outro modo, bastante comum, de expressar esta transformação é em função dos termos

“novo” e “velho”, representando uma transformação da base “velha” para a “nova”, de acordo com a equação 3.9.

$$Z_{PU\text{ novo}} = Z_{PU\text{ velho}} * \frac{S_{B\text{ novo}}}{S_{B\text{ velho}}} * \left(\frac{V_{B\text{ velho}}}{V_{B\text{ novo}}} \right)^2 \quad (3.9)$$

3.3 TEOREMA DE FORTESCUE

No ano de 1918, Charles Legeyt Fortescue apresentou na convenção anual da American Institute of Electrical Engineers o artigo “Method of Symmetrical Coordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks”, de acordo com este trabalho, um sistema polifásico de n fasores desequilibrados pode ser decomposto na soma de n sistemas equilibrados. No caso de sistemas de potência e análise de faltas, tem-se que um sistema trifásico desequilibrado pode ser decomposto em três sistemas trifásicos equilibrados, que são os componentes simétricos. [7]

Estes três conjuntos equilibrados são a componente de sequência positiva, componente de sequência negativa e componente de sequência zero. A primeira é composta de três fasores de mesmo módulo, defasados de 120° e com a mesma sequência do sistema original. A segunda consiste de três fasores de mesmo módulo e também defasados de 120° , mas com sequência oposta a do sistema original. Já a componente de sequência zero é composta de três fasores com o mesmo módulo e fase. A Figura 3 ilustra essa decomposição e suas características. [7]

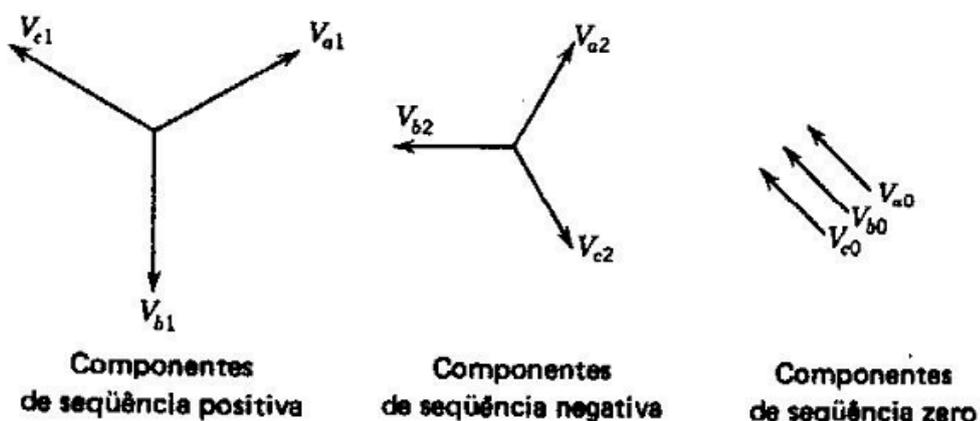


Figura 3 - Componentes de sequência

Fonte: [7]

3.3.1 Estudo matemático

Observada a apresentação qualitativa do teorema de Fortescue, faz-se necessário o desenvolvimento da relação matemática entre os fasores do sistema original e os fasores das componentes simétricas. Como cada um dos fasores desequilibrados é a soma de suas componentes, é possível obter esta relação de acordo com o conjunto de equações 3.10. [7]

$$\begin{aligned} V_a &= V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} \\ V_b &= V_{b0} + V_{b1} + V_{b2} \\ V_c &= V_{c0} + V_{c1} + V_{c2} \end{aligned} \quad (3.10)$$

Utilizando o operador “a” ($e^{j2\pi/3}$), que causa a rotação do fasor em 120° no sentido anti-horário, todos os fasores serão referenciados ao conjunto formado por V_{a0} , V_{a1} , V_{a2} .

$$\begin{aligned} V_a &= V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} \\ V_b &= V_{a0} + a^2 * V_{a1} + a * V_{a2} \\ V_c &= V_{a0} + a * V_{a1} + a^2 * V_{a2} \end{aligned} \quad (3.11)$$

Na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Também é possível expressar as componentes de sequência em função das variáveis do sistema original, para isso multiplicam-se ambos os lados da equação matricial à esquerda pela inversa da matriz A (A^{-1}), conforme equação 3.14.

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

O desenvolvimento apresentado refere-se ao conjunto de fasores de tensão, mas pode ser estendido para a relação entre as correntes de seqüência e as correntes do sistema desequilibrado de acordo com a equação 3.15. [7]

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

3.3.2 Corrente de Sequência Zero

A corrente de seqüência zero é de fundamental importância no estudo do curto-circuito fase-terra (FT), que é a falta mais comum em redes de distribuição. Observando a equação 3.15, pode-se exprimir I_{a0} em função das contribuições de cada corrente de linha conforme a equação 3.16.

$$I_{a0} = \frac{1}{3} * (I_a + I_b + I_c) \quad (3.16)$$

Para o circuito trifásico ligado em Y, Figura 4, pode-se relacionar a soma das correntes de linha com a corrente que circula no neutro e então a corrente de neutro com a corrente de seqüência zero, resultando na equação 3.18.

$$I_a + I_b + I_c = I_n \quad (3.17)$$

$$I_{a0} = \frac{1}{3} * I_n \quad (3.18)$$

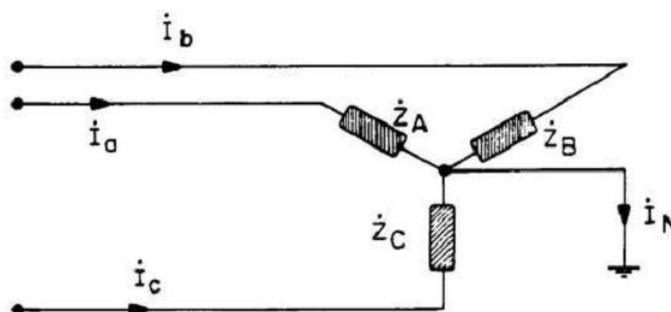


Figura 4 - Carga conectada em Y com neutro

Fonte: [5]

Deste modo, só existe corrente de seqüência zero se houver corrente de neutro, ou seja, não existe corrente de seqüência zero na ligação em Y com o neutro em aberto ou na ligação em Δ , uma vez que a soma das correntes I_a , I_b e I_c é zero, o que pode ser observado na Figura 5 e equação 3.20.

$$I_{a0} = \frac{1}{3} * (I_a + I_b + I_c) \quad (3.19)$$

$$I_{a0} = \frac{1}{3} * 0 = 0 \quad (3.20)$$

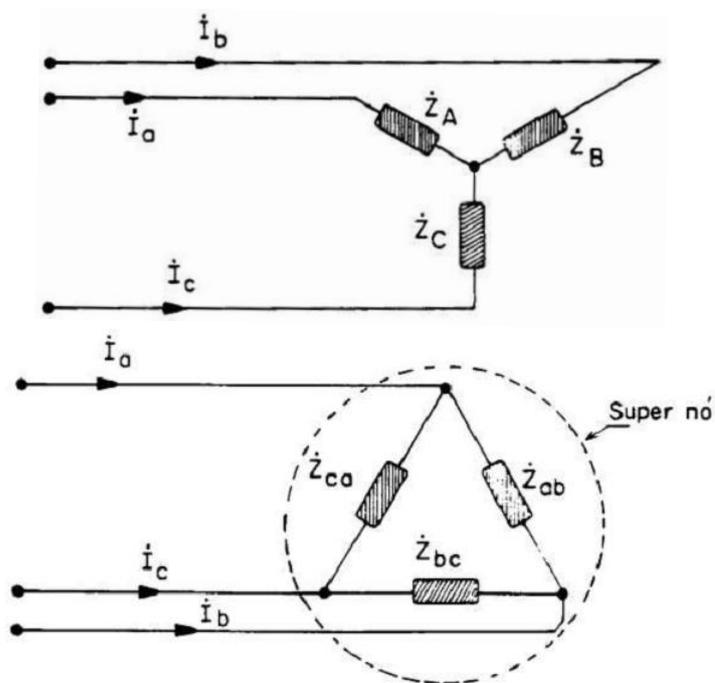


Figura 5 - Cargas conectadas sem neutro

Fonte: [5]

3.4 IMPEDÂNCIAS DE SEQUÊNCIA

Com o intuito de levantar as impedâncias necessárias para o cálculo de curto-circuito em redes de distribuição radial (Figura 6), tem-se por base que as impedâncias equivalentes a montante do transformador de força da subestação são conhecidas através dos estudos de falta da transmissão. Sendo assim, faz-se necessária a obtenção das impedâncias de seqüência positiva, negativa e zero do TR e da rede de distribuição até o local da falta de interesse,

compondo, na realidade, um somatório de impedâncias de sequência. Esta é uma simplificação do problema, onde se supõe que não circula corrente em qualquer elemento a jusante da falta. [1]

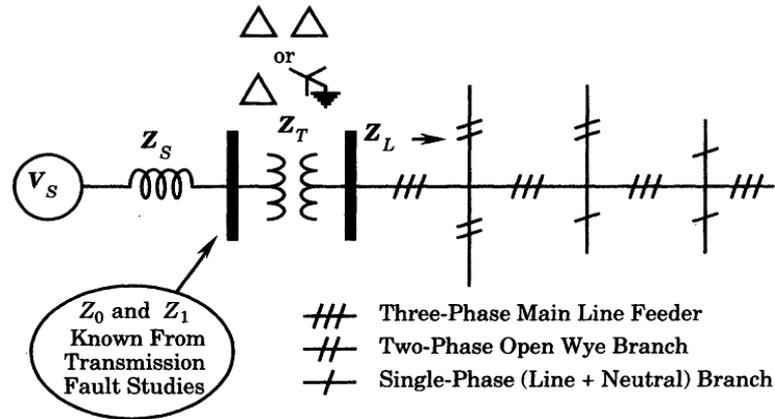


Figura 6 – Distribuição radial

Fonte: [1]

$$Z_1 = \sum_{i=1}^n Z_1^n \quad (3.21)$$

$$Z_2 = \sum_{i=1}^n Z_2^n \quad (3.22)$$

$$Z_0 = \sum_{i=1}^n Z_0^n \quad (3.23)$$

3.4.1 Transformador Trifásico da Subestação

Os transformadores de força de uma subestação geralmente possuem dois tipos de ligação, Δ - Δ ou Δ - Y_{ATERRADO} , de tal modo que teremos que analisar as impedâncias de sequência para cada caso. Soma-se a isso o fato de o transformador ser um elemento passivo e estático do sistema, onde a sequência de fase (positiva ou negativa) escolhida no ensaio de curto-circuito do mesmo terá como resultado um valor igual para ambos os casos, de modo que fica definido, no caso do transformador, o disposto na equação 3.24.

$$Z_1 = Z_2 \quad (3.24)$$

3.4.1.1 Ligação Δ - Δ

Nesta ligação, como não existe neutro aterrado, logicamente a corrente de neutro é zero e conseqüentemente a corrente de seqüência zero é nula, de modo que este sistema é modelado, quanto à impedância de seqüência zero (Z_0), como um circuito aberto. [5]

$$Z_0 = \infty \quad (3.25)$$

Para a impedância de seqüência positiva, o transformador é um elemento série do circuito e tem seu valor descrito na placa do mesmo em valores “pu”, com relação a sua potência aparente (S) e sua tensão de linha. [5]

$$Z_1 = Z_2 = Z_{TR} \quad (3.26)$$

3.4.1.2 Ligação Δ -Y_{ATERRADO}

Neste caso, onde o transformador possui ligações diferentes, irão existir duas impedâncias de seqüência zero (Z_0), uma “vista” pelo lado do delta e outra vista pelo lado do Y. Como explicado anteriormente, não existe corrente de neutro no lado do Δ , portanto Z_0 é infinito. Já no lado do Y, esta impedância terá o mesmo valor do Z_{TR} . Portanto ficam definidas as relações 3.27 e 3.28. [5]

$$Z_{0\Delta} = \infty \quad (3.27)$$

$$Z_{0Y} = Z_1 = Z_2 = Z_{TR} \quad (3.28)$$

3.4.2 Rede de Distribuição

No caso de linhas de distribuição, que são elementos estáticos do sistema, assim como transformadores, as impedâncias de seqüência positiva e negativa são as mesmas e possuem o valor da impedância da linha (Z_L). [1]

$$Z_1 = Z_2 = Z_L \quad (3.29)$$

3.4.2.1 Sequência Positiva e Negativa

A impedância da linha pode ser calculada conforme a expressão 3.20. [1]

$$z_l = r_l + j(x_a + x_d) \Omega/kft \quad (3.30)$$

Onde:

- r_l é a resistência do condutor por mil pés;
- x_a é a reatância indutiva devido ao fluxo magnético até um pé do condutor;
- x_d é a reatância indutiva devido ao fluxo magnético além de um pé do condutor;
- kft é igual a 1000 pés (1 pé = 0,3048m).

Além disto, tem-se que a resistência do condutor (r_l) e reatância x_a podem ter seus valores encontrados em tabelas, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros de cabos elétricos

Wire Size			Diam in inches	Mass lb/kft	Approx Amp Capacity (1)		Resistance in Ω/kft (2)	Reactance X1 in Ω/kft (3)
AWG	Strands	kCM						
Copper – Hard Drawn								
8	(1)	16.51	.128	50	50	80	.656	.126
6	(1)	26.25	.162	80	70	110	.413	.121
4	(3)	41.74	.254	128	110	161	.263	.114
2	(7)	66.37	.292	205	145	210	.167	.109
1	(7)	83.69	.328	258	170	245	.132	.106
1/0	(7)	105.5	.368	326	200	285	.105	.1035
2/0	(7)	133.3	.414	411	240	335	.083	.101
3/0	(7)	167.8	.464	518	280	390	.066	.098
4/0	(7)	211.6	.522	653	330	450	.053	.095
	(19)	250.0	.574	772	375	510	.045	.092
	(19)	300.0	.629	926	425	575	.037	.090
	(19)	350.0	.679	1081	475	635	.032	.088

(1) Conductor at 80 C, 40 C ambient, emissivity = 0.5 for Cu, 0.2 for A.

Lower current values correspond to still air, higher values to air moving at 2 ft/s

(2) Resistance of conductor in Ω/kft at 60 Hz, 25 C

(3) Reactance of conductor out to one ft in Ω/kft at 60 Hz

Total reactance = $x_a + x_d$ where x_d = external reactance beyond 1 ft obtained from curve in Figure C.1.

Fonte: [1]

Para o cálculo da reatância em função do fluxo magnético além de um pé do condutor, utiliza-se a expressão 3.31.

$$x_d = \log_{10} D_m - 0,057 \Omega/kft \quad (3.31)$$

Onde:

- D_m é a distância média geométrica dos condutores A, B e C, com os valores em polegadas.

$$D_m = \sqrt[3]{D_{AB}D_{BC}D_{AC}} \quad (3.32)$$

3.4.2.1. Sequência Zero

O cálculo da impedância de sequência zero de uma linha de distribuição é muito mais complexo, visto que o caminho seguido pela corrente no retorno depende da condutividade do solo e das características do cabo de neutro, além dos cabos de fase e do aterramento do sistema. Podendo-se estimar este valor através da Tabela 2. [5]

Tabela 2 – Valores padrão de impedância de sequência zero

BITOLA	COMP. DE IMP. DE SEQ. POSIT. E NEGAT.		COMP. DE IMPED. DE SEQ. ZERO P/ LINHA S/ NEUTRO MULTI-ATERR.		BITOLA	CABO-NEUTRO	COMP. DE IMPED. DE SEQ. ZERO P/ LINHA C/ NEUTRO MULTI-ATERR.	
	R1=R2	X1=X2	R0	X0			R0	X0
336,4	0,187	0,403	0,364	1,86	336,4	3/0	0,492	1,201
						1/0	0,575	1,301
4/0	0,297	0,424	0,474	1,882	4/0	1/0	0,685	1,323
						2	0,737	1,467
3/0	0,375	0,433	0,552	1,891	3/0	1/0	0,763	1,332
						2	0,815	1,476
2/0	0,473	0,442	0,65	1,899	2/0	2	0,913	1,484
						4	0,908	1,632
1/0	0,595	0,451	0,772	1,917	1/0	2	1,035	1,493
						4	1,03	1,641
2	0,948	0,468	1,125	1,926	2	2	1,388	1,511
						4	1,383	1,659
4	1,504	0,486	1,681	1,943	4	4	1,939	1,676
						6	1,869	1,792
6	2,4	0,503	2,577	1,961	6	6	2,785	1,809

Impedância dos condutores de CA em Ω/km
 Temperatura do condutor, 50°C
 Espaçamento equivalente trifásico - 1,35 m
 Espaçamento equivalente cabo neutro - 1,586 m

Resistividade da terra - 100 Ω^*m
 Frequência - 60Hz

Fonte: [5]

3.5 CURTO-CIRCUITO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO RADIAL

As faltas em redes de distribuição radial possuem certas características inerentes a esta configuração do sistema de potência. Uma delas é que o fluxo de potência possui somente um sentido, da fonte para a carga, o que elimina a necessidade de elementos de proteção direcionais. Além disso, linhas de distribuição operam com tensões menores que linhas de transmissão ou subtransmissão e os cabos utilizados possuem impedâncias maiores, onde geralmente circula uma corrente de menor magnitude. [1]

Para o cálculo de faltas utiliza-se a premissa de que correntes de uma determinada sequência geram tensões apenas naquela sequência, o que pode ser expresso conforme o conjunto de equações 3.33. [7]

$$\begin{aligned} V_{a1} &= E - I_{a1}Z_1 \\ V_{a2} &= -I_{a2}Z_2 \\ V_{a0} &= -I_{a0}Z_0 \end{aligned} \quad (3.33)$$

Escrevendo na forma matricial

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

É importante salientar que no cálculo de curto-circuito, as correntes das cargas são desprezadas, portanto tem-se que I_a , I_b e I_c são as contribuições de cada fase para a falta. [7]

3.5.1. Trifásico (FFF)

O curto-circuito trifásico está em uma classe especial, que é das faltas simétricas, onde as correntes circulando nas três fases são iguais, sendo somente considerada a impedância de sequência positiva. [5] Assim, a corrente de curto-circuito pode ser calculada da seguinte forma:

Condições de contorno:

- $I_{a0} = I_{a2} = 0$

Matriz de correntes:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ I_{a1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

$$I_a = I_{a1} \quad (3.36)$$

Como só existe corrente de sequência positiva neste curto-circuito, a falta dependerá exclusivamente das componentes de sequência positiva I_1 , V_1 e Z_1 de cada fase, de tal forma que é utilizada a expressão 3.37 para a corrente de curto-circuito trifásico.

$$I_{apu} = \frac{1}{Z_{1pu}} \quad (3.37)$$

3.5.2. Bifásico (FF)

Neste curto-circuito existe o contato de apenas duas fases, caracterizando uma falta assimétrica. Como a corrente de neutro é nula, apenas as correntes de sequência positiva e negativa estão presentes no sistema. [5]

Condições de contorno:

- $I_a = 0$
- $I_b = -I_c$
- $V_b = V_c$

Matriz de correntes:

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ I_b \\ -I_b \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

Conclusões: $I_{a0} = 0$, $I_{a1} = -I_{a2}$

Matriz de tensões:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_b \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

Conclusões: $V_{a1} = V_{a2}$

Observadas as conclusões, monta-se o circuito da Figura 7 para cálculo das correntes de seqüência e posterior cálculo da corrente de falta.

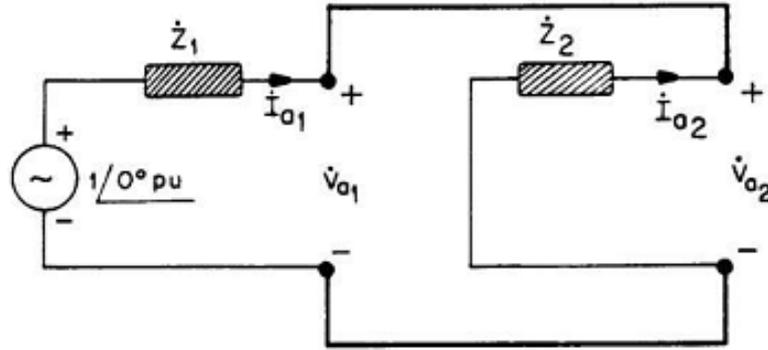


Figura 7 – Circuito para falta bifásica

Fonte: [5]

Assim, é possível levantar as correntes de seqüência e as respectivas correntes que circulam pelas linhas.

$$I_{a1pu} = -I_{a2pu} = \frac{1}{Z_{1pu} + Z_{2pu}} \quad (3.40)$$

Utilizando $Z_1 = Z_2$

$$I_{a1pu} = -I_{a2pu} = \frac{1}{2 * Z_{1pu}} \quad (3.41)$$

$$I_b = I_{a0} + a^2 I_{a1} + a I_{a2} = I_{a1} * (a^2 - a) \quad (3.42)$$

$$I_{bpu} = \frac{1}{2 * Z_{1pu}} * \sqrt{3} * e^{j\pi/2} = \frac{\sqrt{3} * e^{j\pi/2}}{2 * Z_{1pu}} \quad (3.43)$$

$$|I_{bpu}| = \frac{\sqrt{3}}{2 * |Z_{1pu}|} \quad (3.44)$$

3.5.3. Monofásico (FT)

Nesta falta assimétrica ocorre o contato de uma linha com a terra, onde existe, circulando, tanto corrente de sequência positiva e negativa, como de sequência zero, uma vez que ocorre o retorno de corrente pela terra. [5]

Condições de contorno:

- $V_a = 0$
- $I_b = I_c = 0$

Matriz de correntes:

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

Conclusões: $I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = I_a/3$

Como as correntes de sequência são iguais e possuem o mesmo sentido, pode-se afirmar que as impedâncias de sequência estão ligadas em série, então o circuito da Figura 8 é montado.

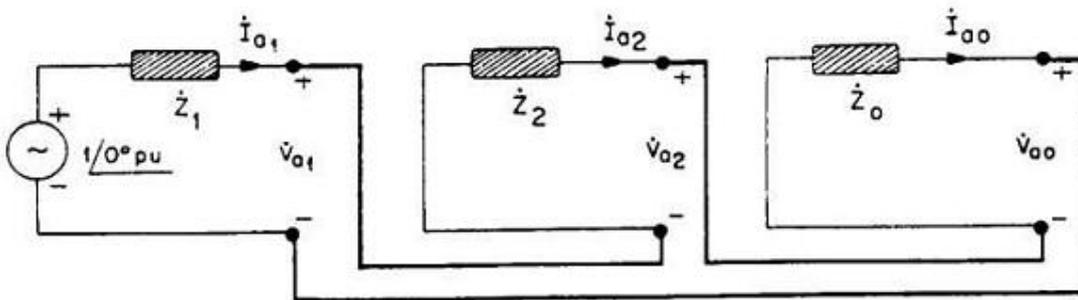


Figura 8 – Circuito para falta monofásica

Fonte: [5]

Assim, as correntes de sequência e as correntes que circulam pelas linhas podem ser expressas, respectivamente, por 3.46 e 3.48.

$$I_{a1pu} = \frac{1}{Z_{1pu} + Z_{2pu} + Z_{0pu}} \quad (3.46)$$

Utilizando $Z_1 = Z_2$

$$I_{a1pu} = \frac{1}{2 * Z_{1pu} + Z_{0pu}} \quad (3.47)$$

$$I_{apu} = 3 * I_{a1pu} = \frac{3}{2 * Z_{1pu} + Z_{0pu}} \quad (3.48)$$

3.5.3.1 MONOFÁSICO MÍNIMO (FT+Z_D)

No caso do curto-circuito monofásico, é interessante a existência de uma referência quanto à corrente mínima que pode circular devido a esta falta, para que seja feito um estudo de proteção adequado. O que acontece nesta situação é que o contato com a terra, por parte de uma fase, pode ocorrer através de uma impedância, que pode estar relacionada com um arco elétrico por meio da ionização do ar. Deste modo, existe uma corrente reduzida em relação ao curto-circuito monofásico sem impedância de defeito (Z_d).

Para o cálculo desta falta, utilizam-se os conceitos do item 3.5.3 com a adição da impedância de defeito na rede de sequência zero. Como a corrente de neutro é três vezes maior que I_{a0} , Z_d deve ser multiplicado por três e dividido por Z_{BASE} , de forma a adequá-lo ao diagrama de rede de sequência. [5]

$$I_n = 3 * I_{a0} \quad (3.49)$$

Assim, a nova rede de sequência é apresentada na Figura 9.

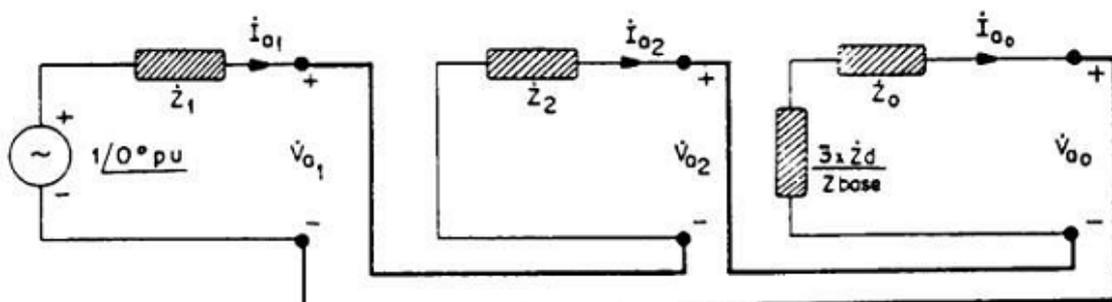


Figura 9 - Circuito para falta monofásica mínima

Fonte: [5]

Observando a Figura 9, pode-se concluir que a única diferença deste circuito, em relação ao circuito da Figura 8, é a adição da impedância de defeito, que pode ser somada com Z_0 , com isso a nova corrente de falta é expressa pela equação 3.50.

$$I_{apu} = 3 * I_{a1pu} = \frac{3}{2 * Z_{1pu} + Z_{0pu} + 3 * Z_{dpu}} \quad (3.50)$$

4 COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE

Com o intuito de proteger de maneira adequada o alimentador, faz-se necessária a correta coordenação entre os dispositivos de proteção, assim como uma filosofia bem definida de seletividade. No caso de redes de distribuição, com o correto emprego de relés, religadores e fusíveis, é possível proteger o alimentador de forma confiável. [1]

4.1 RELÉ E DISJUNTOR

Estes dois elementos operam juntos, de modo que o relé é um dispositivo que tem por objetivo detectar uma condição anormal de operação daquele sistema e tomar as medidas apropriadas. A partir do momento em que o relé detecta, através dos instrumentos de medição, uma tensão ou corrente acima de seu valor mínimo de operação (pickup), este atua no disjuntor de forma a abrir os seus contatos. [19]

Já o disjuntor é um dispositivo que tem a capacidade de abrir e fechar um contato elétrico, com o intuito de eliminar correntes de falta, assim como seccionar o circuito sob correntes de carga. Além disto, o disjuntor é construído de maneira a eliminar possíveis arcos voltaicos provenientes de sua operação. [19]

4.2 RELIGADOR

O religador é um elemento de proteção autônomo, geralmente utilizado como um sensor de sobrecorrente em linhas de distribuição. Uma de suas características mais relevantes é a capacidade de reenergizar o sistema no caso da extinção de uma falta temporária. Além disso, o religador pode atuar de acordo com um esquema composto de curvas “lentas” e “rápidas”, de modo a impedir que os fusíveis a jusante operem no caso de faltas temporárias, prática esta conhecida como “fuse saving”. [19]

4.3 FUSÍVEL

O fusível é um dispositivo de proteção de sobrecorrente, pode ser constituído de um ou mais elementos fusíveis em série, com características distintas. Estes elementos são construídos de modo que se uma corrente acima de um dado limiar fluir pelo dispositivo, o elemento fusível irá fundir-se e assim interromperá o circuito. [19]

4.4 COORDENAÇÃO ENTRE RELÉS

Com o intuito de realizar a coordenação manual entre relés, utiliza-se os conceitos descritos neste item, considerando-se também as curvas fornecidas pelo fabricante do equipamento, ou ainda o auxílio de programas destinados a este fim. Alguns critérios comumente utilizados para o ajuste de relés de sobrecorrente são relacionados a seguir. [1]

I. Corrente de Pickup (CP) ou Corrente Mínima de Operação

a) Relé de Fase

Ajustar a CP de fase, de modo que seu valor seja maior que 200% da máxima corrente de carga e menor que 50% da corrente de falta bifásica do final da zona de proteção.

$$2 * I_{LMÁX} < MOC_F < 0.5 * I_{FF} \quad (4.1)$$

b) Relé de Neutro

Ajustar a CP de neutro, de modo que seu valor seja menor que 33% do MOC de fase, e que este valor seja menor que 50% da falta fase-terra do final da zona de proteção.

$$MOC_N < 0.33 * MOC_F \quad \text{e} \quad MOC_N < 0.5 * I_{FT} \quad (4.2)$$

II. Tap do Relé

O tap do relé pode ser ajustado de forma a adequar-se aos diferentes níveis de corrente no primário, e diferentes relações do transformador de corrente (TC).

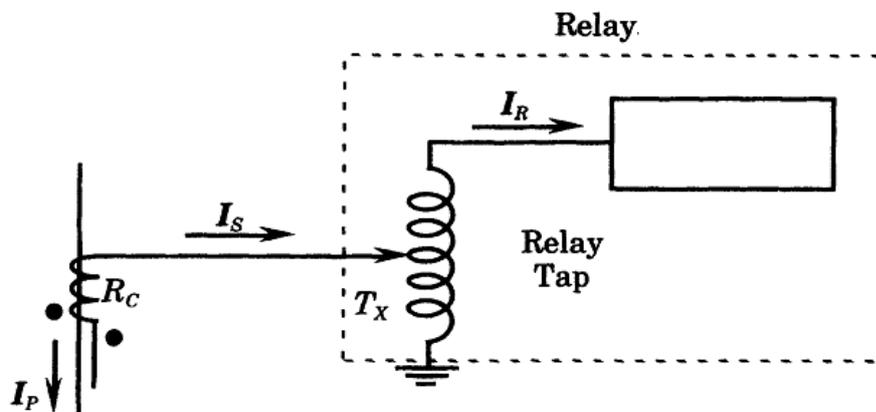


Figura 10 – Transformações de corrente

Fonte: [1]

Na Figura 10 a corrente do primário (I_P) gera a corrente no secundário (I_S) de acordo com uma relação de transformação (R_C) do TC. Em um segundo momento existe outra transformação de corrente que é devido ao tap do relé (T_X). Este último parâmetro deve ser ajustado de forma que a corrente no relé (I_R) seja igual à unidade para uma corrente no primário de valor igual a corrente de pickup.

$$I_P = R_C * T_X * I_R \quad (4.3)$$

$$T_X = \frac{MOC}{R_C} \quad (4.4)$$

III. Corrente de Falta Crítica

O valor de corrente crítica para uma falta, geralmente, é a corrente máxima no relé a jusante. Este valor corresponde ao múltiplo da corrente de pickup (XPU_{CR}), onde o subscrito tem o significado de crítico.

$$XPU_{CR} = \frac{I_{CR}}{T_X * R_C} \quad (4.5)$$

IV. Time Dial

Nesta etapa é selecionado o time dial através de uma família de curvas (Figura 11), de modo a permitir a correta coordenação para a corrente de falta crítica. Para tanto, o primeiro passo é calcular a máxima corrente de falta do relé a jusante (J) e transformar este valor para múltiplos da corrente de pickup, conforme equação 4.6.

$$XPU_{JMAX} = \frac{I_{JMAX}}{T_{XJ} * R_{CJ}} \quad (4.6)$$

Com os dados referentes ao time dial do relé J e o XPU_{JMAX} pode-se estimar o tempo de operação (t_J) deste dispositivo através da Figura 11, e somando com um intervalo de tempo de coordenação (CTI) de 0.2 a 0.3 segundos, teremos o tempo de operação para o valor crítico calculado no item 3.

$$t_{CR} \geq t_J + CTI \quad (4.7)$$

Observando a Figura 11, com os valores de XPU_{CR} (eixo das abscissas) e t_{CR} (eixo das ordenadas), seleciona-se o time dial, sempre aproximando para a curva acima.

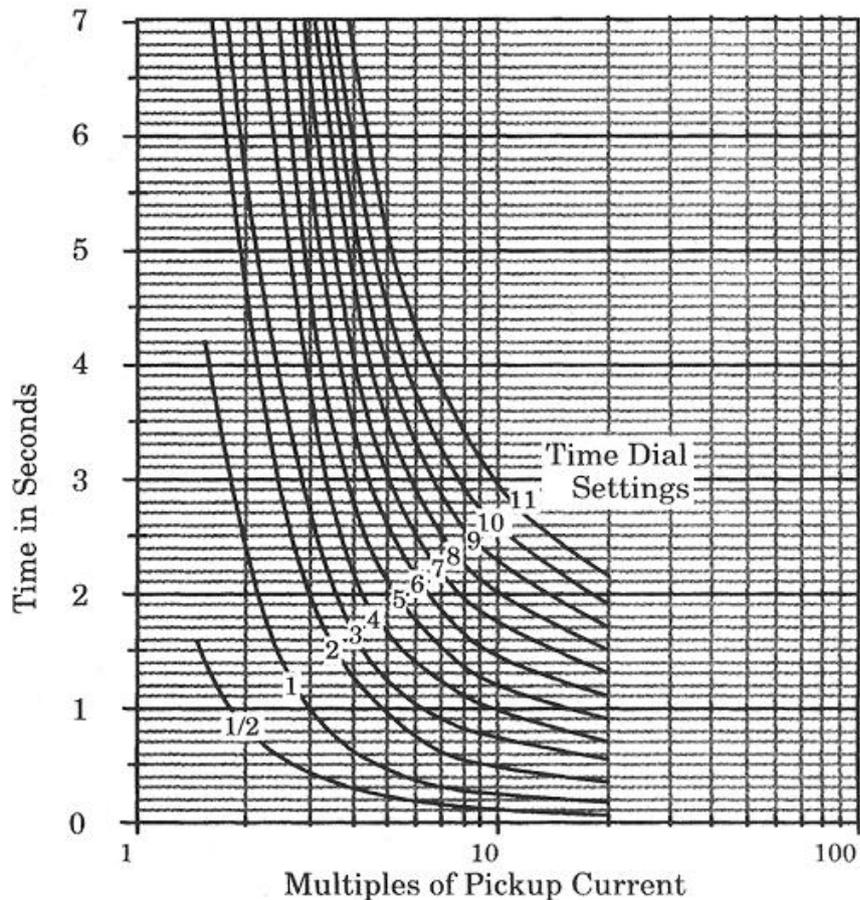


Figura 11 – Time dial

Fonte: [1]

V. Falta Máxima e Repetição do Processo

Aqui é obtido o valor da corrente máxima que poderá fluir neste relé, uma vez que essa informação é necessária para a coordenação com o relé a montante. Após esta etapa os procedimentos são repetidos para todos os relés, até que estes estejam coordenados.

4.5 COORDENAÇÃO ENTRE FUSÍVEIS

A coordenação entre fusíveis pode ser feita através de uma tabela, de modo que o fusível B (a jusante) é definido de acordo com a corrente de carga admissível e o máximo valor de falta naquele ponto, e o fusível A (a montante) é definido através destas informações e em função da escolha de B, observada a Tabela 3. [1]

Tabela 3 – Coordenação entre fusíveis do tipo K

EEI-NEMA K or T Rating	Continuous Current (amperes)	EEI-NEMA K or T Rating	Continuous Current (amperes)	EEI-NEMA K or T Rating	Continuous Current (amperes)
6	9	20	30	65	95
8	12	25	38	80	120†
10	15	30	45	100	150†
12	18	40	60*	140	190
15	23	50	75*	200	200

Protecting		Protected link rating (amperes)												
Fuse Link	8K	10K	12K	15K	20K	25K	30K	40K	50K	65K	80K	100	140	200
Rating, A	Maximum fault current at which B will protect A (amperes)													
6K	190	350	510	650	840	1060	1340	1700	2200	2800	3900	5800	9200	
8K		210	440	650	840	1060	1340	1700	2200	2800	3900	5800	9200	
10K			300	540	840	1060	1340	1700	2200	2800	3900	5800	9200	
12K				320	710	1050	1340	1700	2200	2800	3900	5800	9200	
15K					430	870	1340	1700	2200	2800	3900	5800	9200	
20K						500	1100	1700	2200	2800	3900	5800	9200	
25K							660	1350	2200	2800	3900	5800	9200	
30K								850	1700	2800	3900	5800	9200	
40K									1100	2200	3900	5800	9200	
50K										1450	3500	5800	9200	
65K											2400	5800	9200	
80K												4500	9200	
100K													2000	9100
140K														4000

Fonte: [1]

A Tabela 3 deve ser utilizada da seguinte forma, em um ponto B temos uma determinada corrente de carga, então é selecionado um fusível que suporte continuamente esta corrente. O próximo passo é observar a máxima corrente de falta neste ponto e escolher um valor de fusível para A (a montante) com base neste dado e então verificar se este fusível possui capacidade de condução para corrente de carga e capacidade de interrupção para a maior falta a qual ele está exposto.

4.6 COORDENAÇÃO ENTRE RELÉ E FUSÍVEL

A coordenação entre relé e fusível deve ser tal que, para uma determinada corrente de curto-circuito, o fusível atue, eliminando a falta, antes que o relé seja acionado. Para tanto, deve-se considerar as seguintes definições. A curva de interrupção máxima do elo fusível deve ter um tempo de atuação 25% menor do que a curva temporizada do relé para valores de curto-circuito bifásico no ponto de instalação do elo, até a metade do valor da falta no final do trecho protegido. Além disto, para curto-circuito monofásico mínimo, deve ser feita a mesma relação para valores de corrente no ponto de instalação do elo, até o valor desta falta no final do trecho protegido. [2] [18]

4.7 COORDENAÇÃO ENTRE RELÉ E RELIGADOR

Ao contrário dos relés eletromecânicos e religadores hidráulicos, onde deve-se considerar o reset time, nos controles eletrônicos não existem efeitos adicionais de tempo a ser considerados. Desta forma, a coordenação entre relés e religadores pode ser realizada de acordo com a coordenação entre relés, disposta no item 4.4. [3]

4.8 COORDENAÇÃO ENTRE RELIGADOR E FUSÍVEL

Na coordenação entre religador e fusível algumas definições devem ser levadas em consideração. O religador é, geralmente, ajustado para operar duas vezes de forma “rápida” e duas vezes de forma “lenta” (temporizada), de modo que as duas primeiras operações do religador podem extinguir a falta antes que o elemento fusível seja acionado ou danificado, e as duas últimas operações (na maioria dos casos, a primeira), caso sejam necessárias, farão com que o fusível atue e elimine a falta.

Para que isto ocorra, o tempo mínimo de fusão do elo deve ser maior que a curva rápida do religador multiplicada por um fator. Este fator pode ser observado na Tabela 4. Além disto, o tempo máximo de extinção da falta do fusível não deve ser maior que o tempo de atuação do religador na curva temporizada. [3]

Tabela 4 – Fator de Coordenação

Tempo de Religamento em Ciclos	Fator de Multiplicação	
	Uma Operação Rápida	Duas Operações Rápidas
25-30	1.25	1.8
60	1.25	1.35
90	1.25	1.35
120	1.25	1.35

Fonte: [3]

5 ALOCAÇÃO OTIMIZADA DOS DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO

O objetivo de uma concessionária de energia elétrica é abastecer os consumidores através de um sistema confiável e de baixo custo, de modo que estas demandas de energia sejam atendidas continuamente. [10] Para que esta ideia seja implementada é necessária a proteção adequada dos alimentadores que fazem a distribuição de energia. Em um segundo momento, esta proteção pode ser realocada, reajustada ou ter um aumento no número de componentes disponíveis, de forma que algum índice, ou um conjunto de índices de qualidade do serviço possa ter uma melhora em seu valor.

5.1 ÍNDICADORES DE CONFIABILIDADE

Existem diversos índices que tem por objetivo medir o nível de confiabilidade do serviço de distribuição de energia, alguns deles estão listados abaixo. [10]

- SAIFI (System Average Interruption Frequency Index);
- SAIDI (System Average Interruption Duration Index);
- CAIDI (Customer Average Interruption Duration Index);
- ASAI (Average Service Availability Index);
- MAIFI (Momentary Average Interruption Frequency Index).

Estes índices podem ser minimizados através da correta aplicação de um, ou mais, tipos de proteção. A Tabela 5 mostra a relação entre a categoria da proteção (automática, remota ou manual) e se existe efeito no índice, neste caso marcado com “x”. O primeiro grupo de proteção refere-se a relés, religadores, seccionalizadores automáticos e fusíveis; no segundo grupo temos os seccionalizadores manuais, como as chaves. O terceiro grupo é composto de dispositivos remotos, onde o operador tem o poder de decisão sobre quais medidas serão realizadas e em que ordem.

Tabela 5 – Comparação entre índices

	Índice				
	SAIFI	SAIDI	CAIDI	ASAI	MAIFI
Automática	x	x	x	x	x
Manual		x	x	x	
Remota		x	x	x	

Fonte: [10]

5.1.1 Indicador SAIFI

No problema de otimização proposto, utilizaremos o índice SAIFI, que é definido como sendo a média do número de interrupções que um consumidor sofre em um determinado período de tempo, usualmente um ano.

$$SAIFI = \frac{\sum_{i \in B} I_i N_i}{N_T} \text{ [interrupções/ano]} \quad (5.1)$$

Onde:

- B é o conjunto formado por todas as seções do alimentador;
- N_i é o número de consumidores na seção i ;
- N_T é o número total de consumidores; e
- I_i é o número de interrupções por período avaliado.

5.2 ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO

Existem diversos métodos de otimização, podendo estes serem classificados como estocásticos e determinísticos. Um exemplo bastante conhecido de um algoritmo estocástico é o algoritmo genético, um mecanismo de busca onde o objetivo é encontrar soluções melhoradas baseando-se no conceito de sobrevivência de indivíduos mais aptos em conjunto com mecanismos randômicos de atualização de dados.

Já em se tratando de métodos determinísticos, as técnicas de otimização para programação não linear binária, geralmente empregam uma variante do método de branch and bound, onde em cada nó da árvore de busca um problema não linear é resolvido. Neste projeto um método determinístico é utilizado.

5.3 MODELO PARA ALOCAÇÃO OTIMIZADA DE DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

Com o intuito de alocar de maneira otimizada as proteções disponíveis, iremos utilizar o modelo proposto por [8]. Neste modelo, o alimentador é dividido arbitrariamente em várias seções, considerando que em cada início de seção existe a possibilidade de alocação de um dispositivo de proteção, conforme Figura 12.

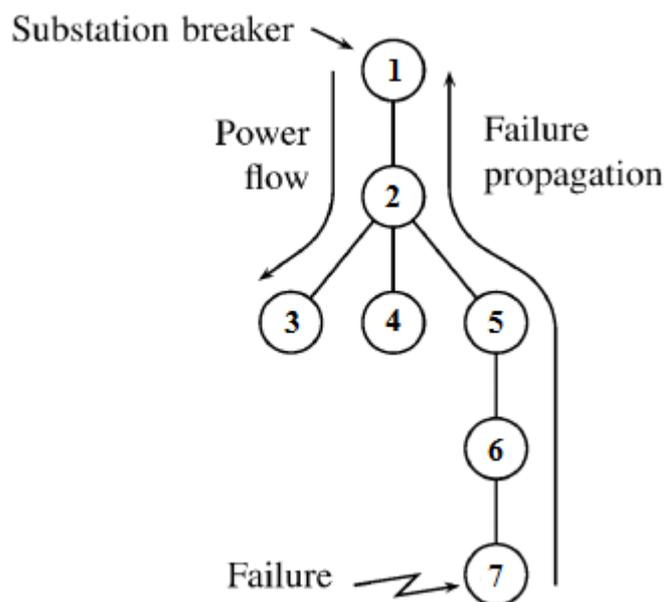


Figura 12 – Alimentador dividido em seções

Fonte: [8]

Para cada um destes trechos algumas informações relevantes são consideradas, sendo elas: as taxas de faltas permanentes e temporárias por ano, e o número de consumidores. Estes dados podem ser representados conforme a Tabela 6.

Tabela 6 – Dados de cada seção

Seção	Taxa de Faltas Permanentes (λ) Falhas/ano	Taxa de Faltas Temporárias (γ) Falhas/ano	Número de Consumidores
1	1.00	2.00	300
2	0.75	1.75	180
3	0.25	0.75	20
4	1.00	2.00	50
5	2.25	5.50	125
6	2.00	4.75	190
7	0.50	2.50	10

Fonte: [8]

5.3.1 Função Objetivo

A função objetivo considerada neste trabalho é derivada do indicador SAIFI, sendo expressa pela equação 5.2. Esta função em um próximo momento será minimizada para que seja encontrada a solução ótima do problema.

$$\sum_{i \in B} \left\{ \sum_{j \in U_i} T_j [2\lambda_i + \gamma_i - \lambda_i x_j - (\lambda_i + \gamma_i) y_j] \left(\prod_{k \in C_i^j} x_k y_k \right) \right\} \quad (5.2)$$

Onde:

- x_j é a variável de decisão quanto à presença de um relé/religador naquela seção;
- y_j é a variável de decisão quanto à presença de um fusível naquela seção;
- B é o conjunto de todas as seções;
- U_i é o conjunto de todas as seções a montante de i , com este incluso, seguindo o sentido de propagação da falta;
- T_j é o número total de consumidores a jusante de j , com este incluso;
- λ_i é a frequência de falha permanente da seção i ;
- γ_i é a frequência de falha temporária da seção j ; e
- C_i^j é o conjunto de seções entre i e j , com $i \geq j$ e j excluído, de acordo com o sentido de propagação da falta, conforme a Figura 13.

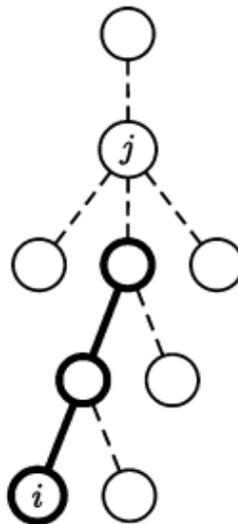


Figura 13 – Topologia do conjunto C_i^j

Fonte: [8]

É importante notar que quando $i = j$, o conjunto C_i^j é, por definição, vazio e o produtório possui valor igual a um, pois este é o elemento neutro da multiplicação.

5.3.2 Variáveis de Decisão

Conforme abordado no item 5.3.1, a função objetivo contém dois tipos de variáveis de decisão, x_j e y_j , que determinam a existência ou não de um dispositivo de proteção na seção j , bem como o tipo de dispositivo que é empregado. Além disto, estas variáveis podem ser ajustadas pelo programador, com o intuito de forçar a presença de um dispositivo de proteção em uma dada seção. As variáveis de decisão são definidas conforme 5.3.

$$\begin{aligned} x_j &= \begin{cases} 0, & \text{se um relé/religador deve ser instalado em } j \\ 1, & \text{caso contrário} \end{cases} \\ y_j &= \begin{cases} 0, & \text{se um fusível deve ser instalado em } j \\ 1, & \text{caso contrário} \end{cases} \end{aligned} \quad (5.3)$$

5.3.3 Restrições do Problema

Um conjunto mínimo de restrições, apresentado a seguir, deve ser empregado para a obtenção de soluções viáveis ao problema.

- a) Caso seja imposta a alocação de um elemento de proteção em uma determinada seção j , (5.4) deve ser respeitada:

$$x_j + y_j = 1 \quad (5.4)$$

- b) Não é possível instalar mais de um elemento de proteção em cada seção, de acordo com (5.5):

$$x_i + y_i \geq 1, \quad \forall i \in B \quad (5.5)$$

- c) Sempre deve existir um relé na subestação:

$$x_1 = 0 \text{ e } y_1 = 1 \quad (5.6)$$

d) O número de religadores/fusíveis disponíveis é limitado, conforme estabelece (5.7):

$$\sum_{i \in B} x_i \geq |B| - (r + 1) \quad (5.7)$$

Onde:

- $|B|$ é o número de seções do alimentador; e
- r é o número de religadores/fusíveis disponíveis.

6 METODOLOGIA DESENVOLVIDA

Nesta seção será apresentado o alimentador, com seus respectivos dados, onde os conceitos discutidos nos itens anteriores serão aplicados. O primeiro passo é a geração do modelo de otimização através do MATLAB, com o fim de montar a função objetivo com suas respectivas restrições. Após esta etapa, este conjunto de equações será exportado de acordo com a sintaxe aceita pelo BARON (Branch And Reduce Optimization Navigator), que é o sistema computacional utilizado na resolução do modelo de programação não linear binária. A solução obtida deste algoritmo indica a posição de cada elemento de proteção ao longo do alimentador, de modo que a etapa de alocação otimizada dos dispositivos de proteção seja concluída.

A próxima etapa do projeto consiste na inserção de todos os dados do sistema, comprimento das linhas, potência das cargas, disposição do sistema, assim como dos elementos de proteção no SKM Power Tools, que é um programa com capacidade para analisar sistemas trifásicos, simular faltas, gerar curvas de coordenação e diversos outros estudos relacionados a sistemas de potência. Com o diagrama unifilar completo, utiliza-se o programa para calcular as correntes em todos os trechos do alimentador através de um “loadflow”, com estes dados é possível definir a corrente de carga, assim como a tensão pré-falta de cada barra do sistema. Através destas informações são calculadas as correntes de curto-circuito que serão utilizadas para ajustar e coordenar cada elemento de proteção.

Realizadas todas estas etapas, o resultado final é apresentado em um diagrama unifilar onde é exposto o sistema utilizado, com suas devidas proteções e os ajustes empregados em cada um destes.

6.1 SISTEMA UTILIZADO

O sistema que é utilizado neste estudo, assim como seus dados, é proveniente de [9]. Este alimentador, apresentado na Figura 14, possui cerca de 93 km de extensão, com tensão nominal de linha de 22 kV, carga de 15871 kVA, proveniente de 3958 unidades consumidoras. Além disto, analisando a sua topologia, o alimentador é composto por uma seção principal e diversas ramificações, o que é uma característica comum em sistemas de distribuição radiais. Os dados de cada seção deste alimentador são apresentados no anexo 2.

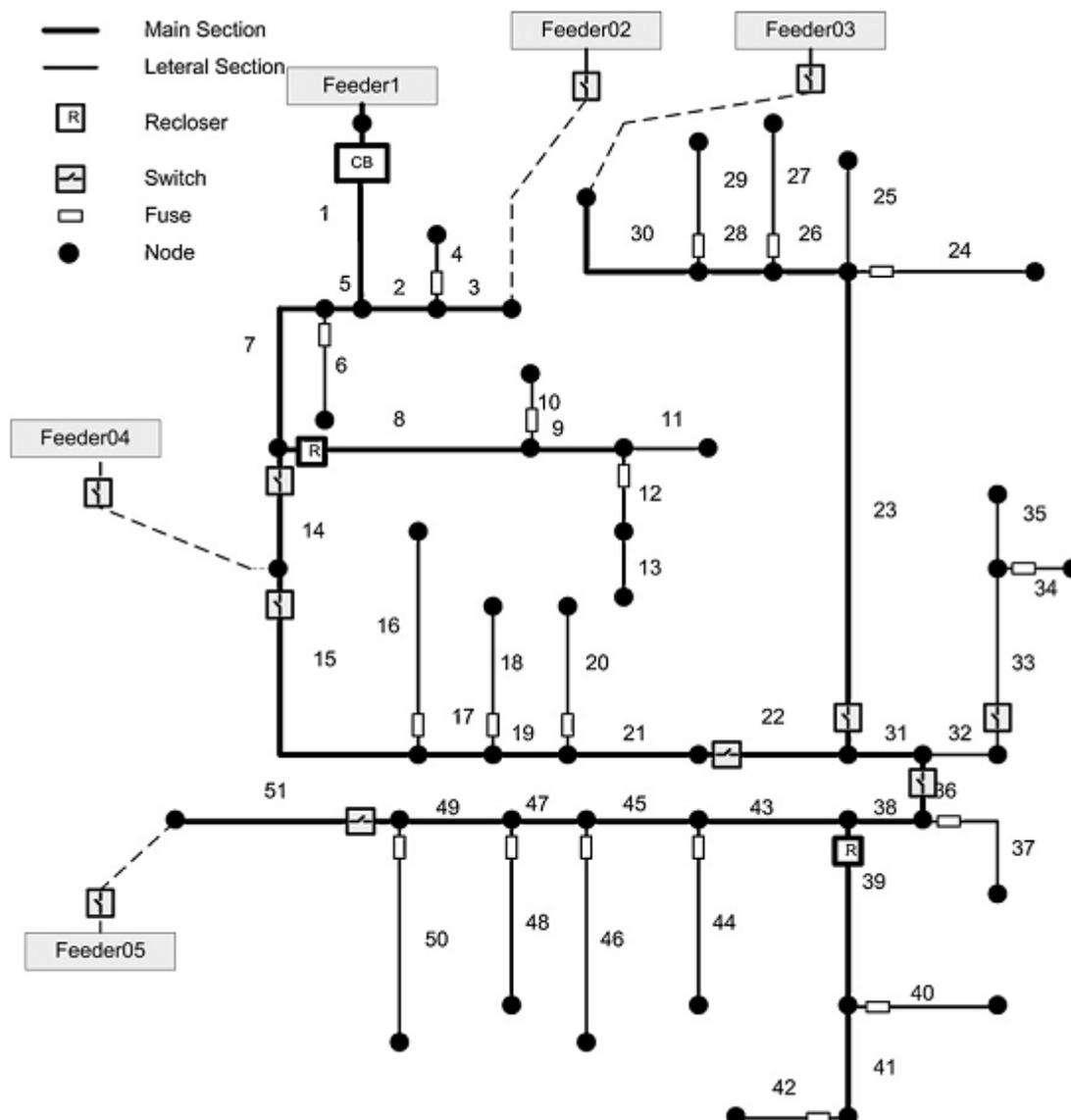


Figura 14 – Sistema trifásico base

Fonte: [9]

Na Figura 14, pode-se observar que na barra da subestação (seção 1) encontra-se instalado um disjuntor (circuit breaker), que é comandado por um relé. Também nota-se a presença de dois religadores (seções 8 e 39) e dezoito fusíveis. São estes elementos que serão realocados de modo a minimizar o indicador SAIFI.

6.2 GERAÇÃO DO MODELO DE OTIMIZAÇÃO

A geração automática do modelo de otimização é parte fundamental no desenvolvimento deste projeto, uma vez que dadas as dimensões do sistema a ser otimizado, a

função objetivo resultante é bastante complexa. Desta forma, se torna inviável a geração do modelo de forma manual. Observadas estas questões, o algoritmo desenvolvido para geração do modelo de otimização segue o roteiro abaixo:

- a) montagem da matriz topologia, que é utilizada para descrever de forma matemática as conexões e o posicionamento de cada seção, conforme Figura 15;

```

%Matriz Topologia:
%  1 2 3 4 5 6 7 8  9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20
T=[0 1 2 2 1 5 5 7  8  8 10 10 12  7 14 15 15 17 17 19
   1 2 3 4 5 6 7 8 10  9 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20

```

Figura 15 – Parte da matriz topologia

Fonte: Autor

- b) vetores de comprimento das seções, consumidores e frequência de faltas;
- c) parâmetros de otimização: número de dispositivos e seções restritas para fusíveis;
- d) conjunto de todas as seções, conjuntos U_i , vetor de consumidores a jusante de cada seção, conjuntos C_i^j ;
- e) criação de vetores de variáveis simbólicas;
- f) aplicação das seções restritas para fusíveis às variáveis simbólicas;
- g) aplicação da presença obrigatória de um relé na seção da subestação;
- h) restrição quanto ao número de proteções em uma seção (apenas uma);
- i) equação da restrição quanto ao número de religadores;
- j) equação da restrição quanto ao número de fusíveis;
- k) vetor de produtórios;
- l) script do MATLAB que obtém a função objetivo, apresentado na Figura 16.

Terminada esta etapa, que tem como fim a produção da função objetivo em conjunto com as restrições, estas relações matemáticas precisam ser exportadas para o formato GAMS, que é o utilizado pelo “solver” BARON. Para isto utiliza-se uma rotina, apresentada no apêndice 3, também no MATLAB, que é responsável por esta conversão.

```

%Função Objetivo
Fobj=sym(zeros(size(T,2),size(T,2)));

for i=1:size(T,2)
    k=0;
    for a=1:size(Ui,2)
        if Ui(i,a)~=0
            j=Ui(i,a);
            if (i==j)
                Fobj(i,j)=Tj(j)*(2*IF(2,i)+IF(1,i)-IF(2,i)*x(j)-(IF(2,i)
            elseif j==1 && i>j
                m=find(Cij(:,1)==i,1,'first');
                Fobj(i,j)=Tj(j)*(2*IF(2,i)+IF(1,i)-IF(2,i)*x(j)-(IF(2,i)
            elseif j>1 && i>j
                m=find(Cij(:,1)==i,1,'first')+length(find(Cij(:,1)==i))
                k=k+1;
                Fobj(i,j)=Tj(j)*(2*IF(2,i)+IF(1,i)-IF(2,i)*x(j)-(IF(2,i)

```

Figura 16 – Parte do script que gera a função objetivo

Fonte: Autor

Uma vez obtido o arquivo, no formato GAMS, com todas as equações necessárias; este é submetido ao “NEOS Server for Optimization”. Este é um sítio da internet, conforme referência [17], onde é possível utilizar a ferramenta BARON com certas restrições, mas sem custo para o usuário. Realizado este processo, o usuário recebe uma resposta do servidor de otimização (Apêndice 4) com as estatísticas e resultados, que são, neste caso, os locais onde devem ser instalados os dispositivos de proteção. Com isto a etapa de otimização da alocação dos dispositivos de proteção é concluída, e os resultados podem ser observados na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultado da localização dos elementos de proteção

Variável	Resultado	Variável	Resultado	Variável	Resultado
x2	1	x28	1	y8	0
x3	1	x29	1	y9	1
x4	1	x30	1	y10	1
x5	1	x31	0	y11	0
x6	1	x32	1	y12	0
x7	1	x33	1	y13	1
x8	1	x34	1	y16	0

x9	1	x35	1	y18	0
x10	1	x36	1	y20	0
x11	1	x37	1	y24	0
x12	1	x38	1	y25	1
x13	1	x39	1	y27	1
x14	1	x40	1	y29	1
x15	1	x41	1	y32	0
x16	1	x42	1	y33	1
x17	1	x43	1	y34	1
x18	1	x44	1	y35	1
x19	1	x45	1	y37	0
x20	1	x46	1	y39	1
x21	1	x47	1	y40	0
x22	1	x48	1	y41	0
x23	0	x49	1	y42	0
x24	1	x50	1	y44	0
x25	1	x51	1	y46	0
x26	1	y4	0	y48	0
x27	1	y6	0	y50	0

Fonte: Autor

Os itens da Tabela 7, destacados em negrito, correspondem às seções do alimentador que terão dispositivos de proteção alocados, sendo que as variáveis x_j definem a alocação dos religadores, e as variáveis y_j a alocação dos fusíveis, conforme definido no item 5.3.2.

6.3 SIMULAÇÃO

Com os resultados da Tabela 7 e os dados de cada seção (apresentados no Anexo 2) é possível montar um diagrama unifilar seguindo o roteiro abaixo:

- a) equivalente do sistema a montante (UTIL-0001);
- b) transformador de força da subestação (XF2-0001);
- c) barra da subestação (BUS-0001 SUBES);
- d) relé do alimentador (PD-0001 SUBES).

Com isso, já constam no programa de simulação todos os elementos relevantes que são uma representação da subestação para a análise de fluxo de potência e curto-circuito. A próxima etapa consiste em inserir todos os cabos, todas as cargas, além dos dezoito fusíveis e os dois religadores conforme solução apresentada na Tabela 7. É importante notar que a carga

de cada seção é considerada como sendo localizada no nó final da respectiva seção. As demais etapas são sumarizadas a seguir:

- e) inserir a barra do começo de seção;
- f) inserir a linha da seção;
- g) inserir a barra de fim de seção;
- h) inserir a carga da seção;
- i) repetir os itens “e”, “f”, “g” e “h” para todas as seções;
- j) alocar os religadores (seções 23 e 31);
- k) alocar os fusíveis.

Com todos os dispositivos e componentes necessários do circuito devidamente instalados e integrados no diagrama unifilar, pode-se realizar a análise de fluxo de potência e curto-circuito. A Figura 17 ilustra a entrada de dados para estas análises.

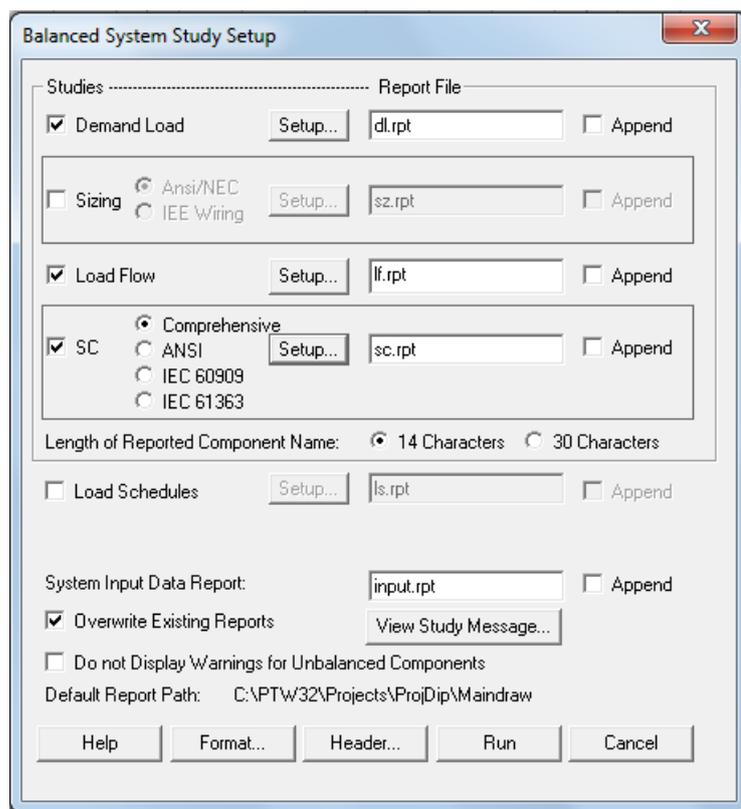


Figura 17 – Tela de ajuste do estudo (SKM Power Tools)

Fonte: Autor

Na Figura 18 observa-se a possibilidade de ajustar cada um dos estudos que serão realizados pelo SKM Power Tools através do seu respectivo botão “Setup”. Além disso, estas simulações geram documentos de texto (.rpt) que podem ser consultados com o fim de obter maiores informações em relação à análise efetuada. Estes documentos são salvos na pasta padrão criada pelo usuário.

Após a realização do estudo, as informações de interesse podem ser visualizadas ao longo do diagrama unifilar por meio de “datablocks”, que são áreas onde são exibidos os dados disponíveis. Os “datablocks” possuem configurações padrão, no entanto, para este projeto, foi desenvolvido um ajuste personalizado. Na Figura 18 é possível visualizar as tensões pré-falta (PFV), assim como as correntes de curto-circuito das barras, além da bitola e corrente que passa pelo cabo, como também a relação do transformador de corrente, a corrente de pickup do relé, e o seu tipo de curva com o respectivo time-dial.

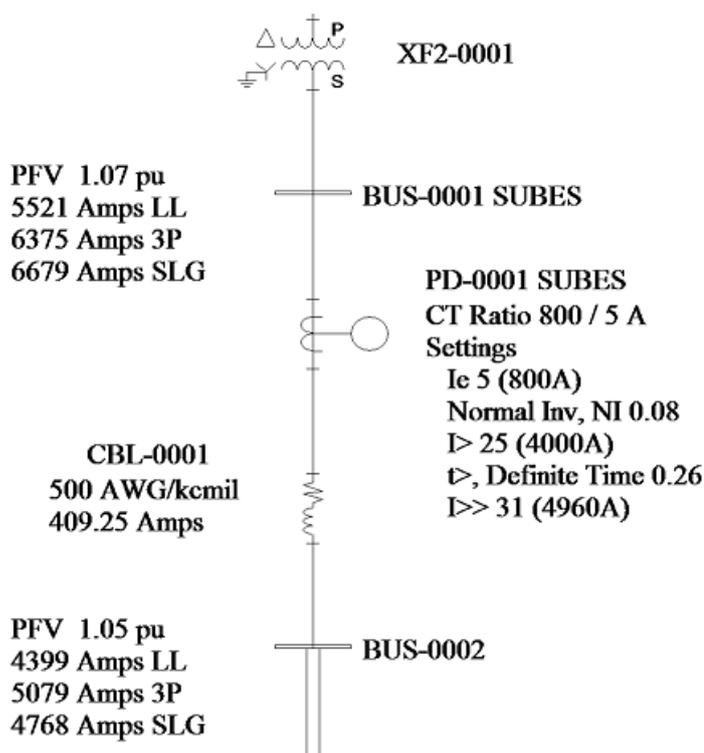


Figura 18 – Unifilar com datablocks e componentes

Fonte: Autor

6.4 AJUSTES DA PROTEÇÃO

Os ajustes da proteção seguem os conceitos apresentados na Seção 4, de modo que os elementos operem de forma coordenada e que seja retirada do circuito, no caso de uma falta permanente, apenas a menor parte possível do alimentador.

Os primeiros elementos dimensionados são os fusíveis das seções laterais do alimentador. Estes são dimensionados de acordo com sua capacidade de condução contínua de corrente e a mínima corrente de falta no final da área protegida. Após são definidos os fusíveis a montante, os ajustes dos religadores e por fim os ajustes do relé da subestação.

6.4.1 Ajuste dos Religadores PD-0031 e PD-0023

Religador PD-0031:

- fabricante: Cooper;
- modelo: VWVE27;
- corrente de pickup de fase temporizado: 380 A;
- curva para corrente de fase temporizado: 163 Response;
- corrente de pickup de fase rápido: 340 A;
- curva para corrente de fase rápido: 101 Response;
- corrente de atuação instantânea de fase rápido: 850 A.

Religador PD-0023:

- fabricante: Cooper;
- modelo: VWVE27;
- corrente de pickup de fase temporizado: 300 A;
- curva para corrente de fase temporizado: 163 Response;
- corrente de pickup de fase rápido: 280 A;
- curva para corrente de fase rápido: 101 Response.
- corrente de atuação instantânea de fase rápido: 700 A.

Estes ajustes podem ser observados em um gráfico de coordenação que relaciona o tempo de atuação dos dispositivos com a corrente que flui pelo elemento de proteção. Esta ilustração é apresentada na Figura 19.

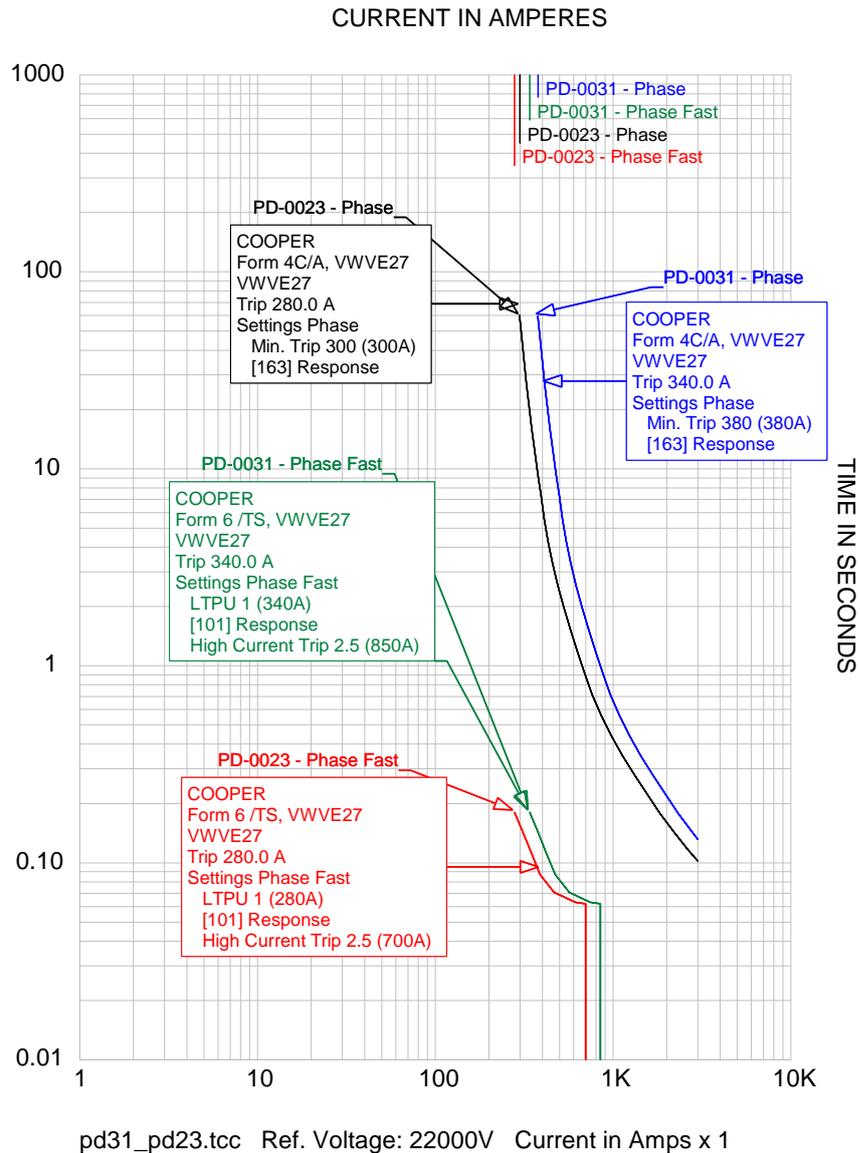


Figura 19 – Religadores PD-0023 e PD-0031

Fonte: Autor

6.4.2 Ajuste do Relé da Subestação

Relé PD-0001 SUBES:

- fabricante: ABB;
- modelo: REF 542;
- corrente de pickup de fase temporizado: 800 A;
- curva para corrente de fase temporizado: Normalmente Inversa, NI;
- time dial: 0.08;

- corrente de tempo definido: 4000 A;
- tempo definido: 260 ms;
- corrente de instantâneo: 4960 A.

A Figura 20 apresenta a curva de operação, com seus respectivos ajustes, do relé ABB da subestação.

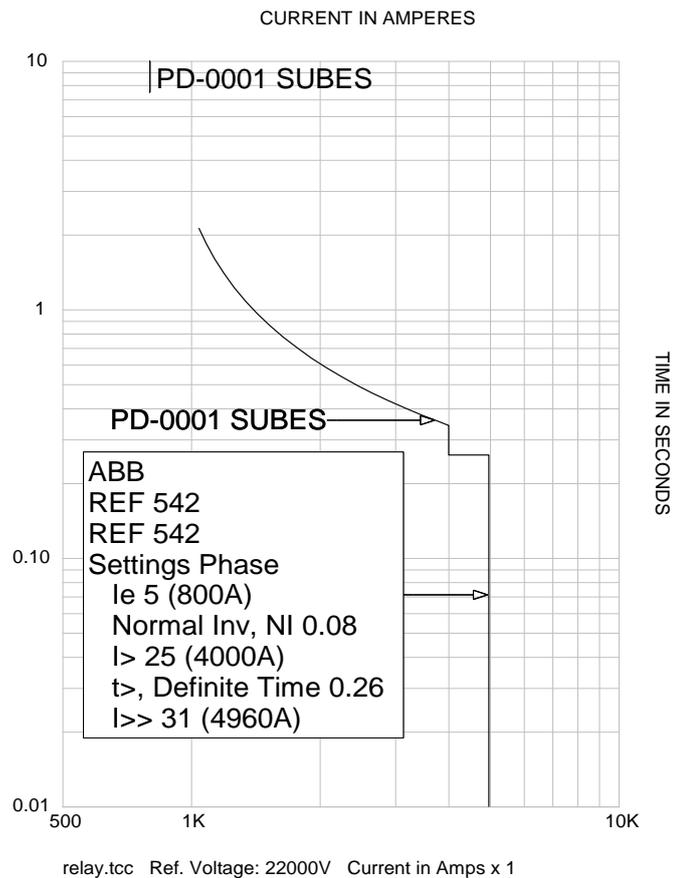


Figura 20 – Relé PD-0001 SUBES

Fonte: Autor

6.5 COORDENOGRAMAS

Com o intuito de verificar de modo gráfico as relações entre as curvas dos diversos elementos de proteção que devem atuar de forma coordenada, é necessário que se apresente os coordenogramas de cada zona de proteção. Começando pelo conjunto de seções dispostas no final do alimentador, observa-se os tempos de atuação de cada elemento de proteção do alimentador.

6.5.1 Religador PD-0023 e Elementos de Proteção a Jusante

No coordenograma exposto na Figura 21, temos as curvas de atuação do religado PD-0023, assim como a resposta do fusível PD-0024, que são os elementos desta zona de proteção. Observando esta figura, percebe-se que no advento de uma falta a jusante do fusível, o religador irá atuar duas vezes de acordo com a sua curva rápida, de modo que o elo não será danificado. No caso de uma falta permanente, o religador passará a atuar conforme sua curva temporizada, que neste caso acarretará na atuação parte do elemento fusível.

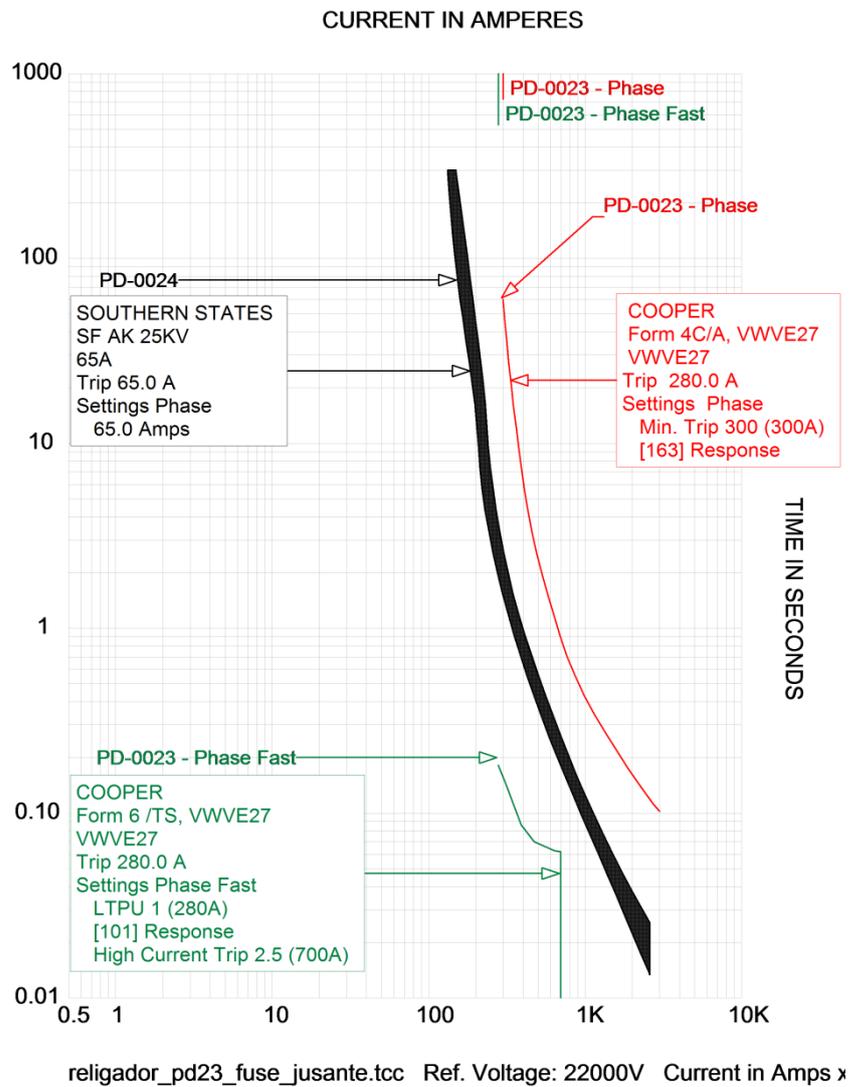


Figura 21 – PD-0023 e PD-0024

Fonte: Autor

6.5.2 Religador PD-0031 e Elementos de Proteção a Jusante

No caso do coordenograma da Figura 22, todos os elementos fusíveis que possuem tempo de atuação maior que a curva rápida do religador (como os fusíveis 65 e 100 K) podem ter suas faltas temporárias eliminadas antes que os elos sofram qualquer dano. No caso do elemento PD-0042, é impossível protegê-lo através da curva rápida do religador, uma vez que dada a localização do mesmo, sua corrente de pickup não pode assumir esta ordem de grandeza, pois o religador atuaria para correntes de carga nominal do circuito.

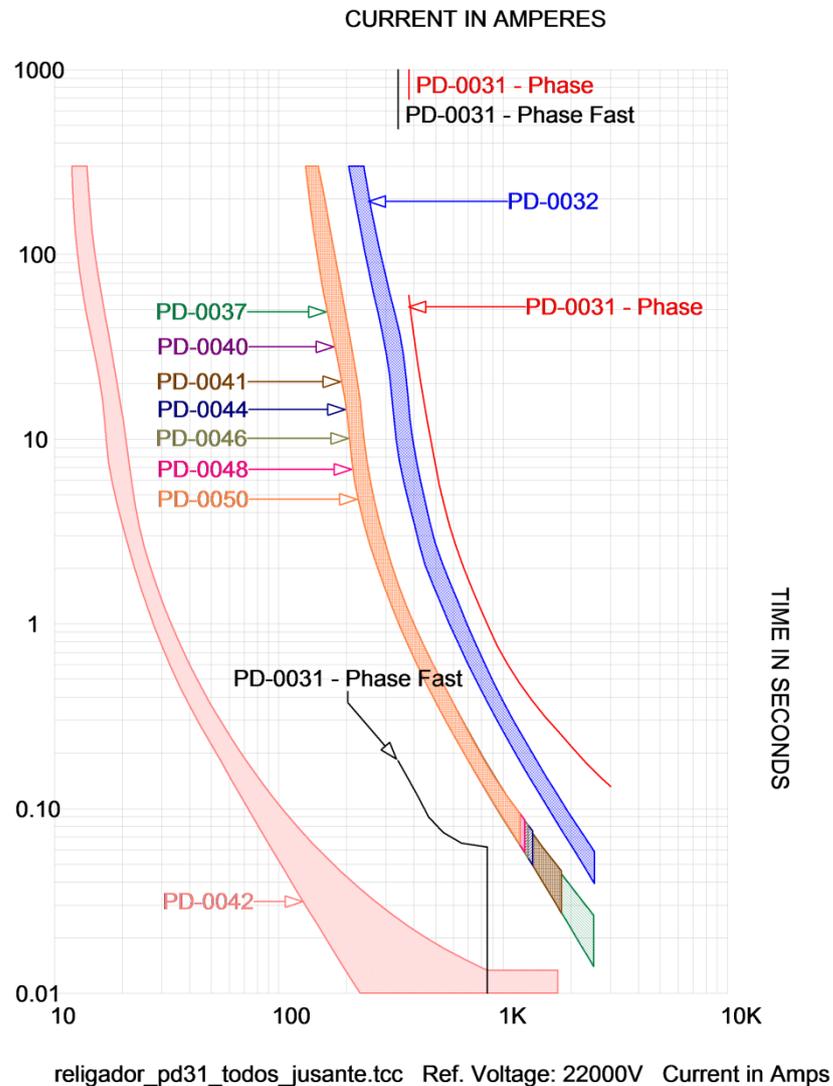


Figura 22 – PD-0031 e fusíveis a jusante

Fonte: Autor

6.5.2 Relé PD-0001 SUBES, Fusíveis e Religadores

Na Figura 23 é apresentado o coordenograma que mostra a curva de atuação do relé da subestação, com seus fusíveis protetores e as curvas temporizadas de ambos os religadores. Esta coordenação é desenvolvida de tal forma que para uma falta a jusante destes fusíveis, eles atuarão antes que o relé da subestação dê o comando para abertura do disjuntor. O esquema é desenvolvido desta maneira, pois uma atuação do relé da subestação implica o desligamento de todas as cargas do circuito, o que, neste caso não é a melhor solução para os consumidores.

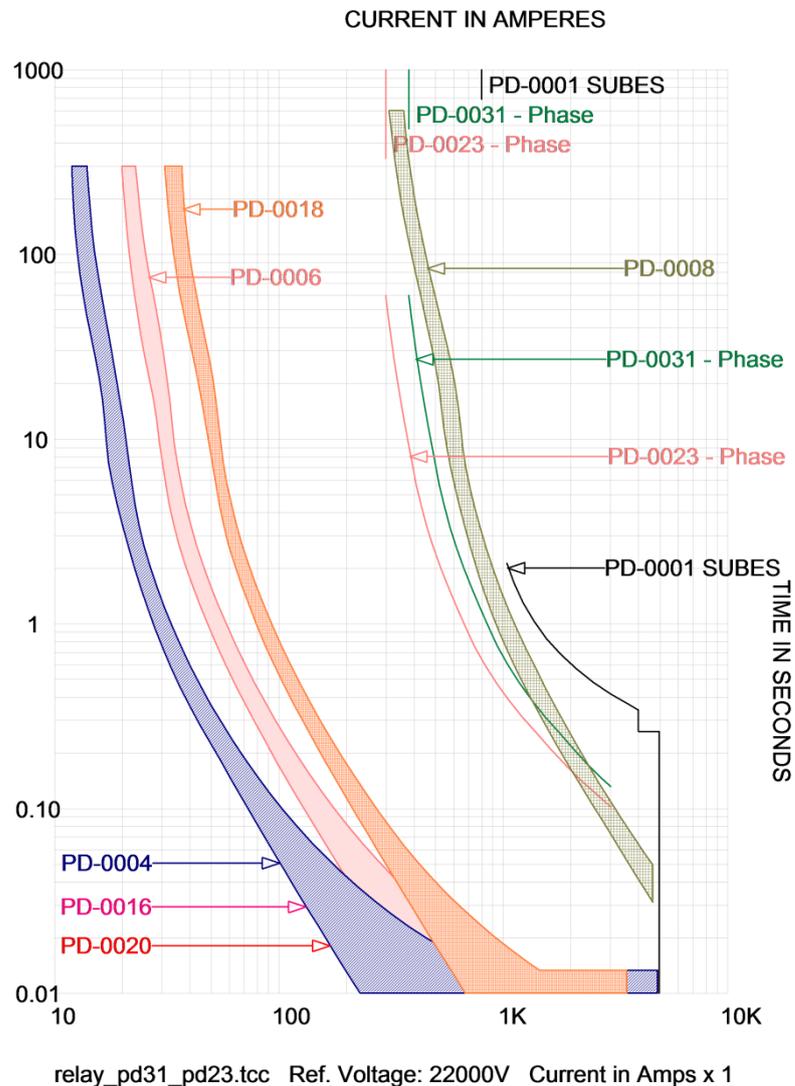


Figura 23 – Relé, religadores e fusíveis

Fonte: Autor

CONCLUSÕES

Para a realização deste projeto foram necessários inúmeros conhecimentos e técnicas que são desenvolvidos ao longo do processo de graduação, assim como novos conceitos e métodos que precisaram ser absorvidos. Com isto, fez-se presente a oportunidade e necessidade de aprendizado, inerente ao processo de consolidação de um bom trabalho.

Com relação à parte técnica, alguns resultados mostraram-se bastante interessantes, como é o caso da parte de programação para geração do modelo de otimização. Esta foi realizada tendo por base um sistema de sete seções. Desde o começo, a ideia era a de criar um algoritmo genérico, com capacidade de gerar a função objetivo em conjunto com suas restrições e exportar para o formato GAMS. Deste modo, quando o sistema de 51 seções foi submetido a este script, todo este processo foi realizado automaticamente, sem a ocorrência de erros.

A segunda parte do projeto foi realizada com o auxílio de uma ferramenta computacional apropriada, no caso o SKM Power Tools, que apesar de seu custo elevado, mostrou-se indispensável. Neste programa foram inseridos todos os dados relevantes do sistema, de forma a realizar a análise de fluxo de potência e curto-circuito. Com estas informações foi efetuada a coordenação dos elementos de proteção, que pode ser avaliada de forma gráfica, evitando assim erros que de outro modo poderiam passar despercebidos.

Concluídos estes procedimentos, tem-se que o alimentador opera de forma otimizada e devidamente protegida, e que os consumidores devem experimentar, na média, um número de interrupções menor do que o anterior. Tal assertiva tem subsídio na redução de aproximadamente 41,89% do indicador SAIFI, sendo o valor original de 8,92 faltas/ano e o valor final, após o processo de otimização, de 5,18 faltas/ano.

Existem alguns pontos que podem ser melhorados neste alimentador. Podem ser realizadas algumas mudanças, como o aumento no número de religadores e a inserção de seccionadores automáticos, que geraram uma nova distribuição das proteções. Além disso, seria interessante a inserção de reguladores de tensão ao longo do alimentador, que por ser bastante longo (93 km), possui uma queda de tensão de cerca de 10% pu entre a barra da subestação e o fim da seção 50.

REFERÊNCIAS

- [1] ANDERSON, P. M. **Power System Protection**. New York, USA: IEEE Press, 1999.
- [2] HOROWITZ, S. H., PHADKE, A. G. **Power System Relaying**. 3. ed. Chichester, England: Wiley e RSP, 2008.
- [3] COOPER POWER SYSTEMS. **Electrical Distribution System Protection**. USA, 2005.
- [4] ANDERSON, P. M. **Analysis of Faulted Power Systems**. Iowa, USA: The Iowa State University Press, 1973.
- [5] KINDERMANN, G. **Curto-Circuito**. 2. ed. Porto Alegre: Sagra Luzzato, 1997.
- [6] WARRINGTON, A. R. van C. **Protective Relays: their Theory and Practice**. 2. ed. Great Britain: Chapman and Hall, 1968.
- [7] GRAINGER, J. J., STEVENSON, W. D. **Power System Analysis**. New York, USA: McGraw-Hill, 1994.
- [8] ZAMBON, E., BOSSOIS, D. Z., GARCIA, B. B., AZEVEDO, E. F. A Novel Nonlinear Programming Model for Distribution Protection Optimization. **IEEE Transactions On Power Delivery**, v. 24, n. 4, p. 1951-1958, out. 2009.
- [9] TIPPACHON, W., RERKPREEDAPONG, D. Multiobjective Optimal Placement of Switches and Protective Devices in Electric Power Distribution Systems Using Ant Colony Optimization. **Electric Power Systems Research**, p. 1171–1178, 2009.
- [10] SOUDI, F., TOMSOVIC K. Optimized Distribution Protection Using Binary Programming. **IEEE Transactions On Power Delivery**, v. 13, n. 1, p. 218-224, jan. 1998.

[11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14724**: informação e documentação: trabalhos acadêmicos: apresentação. Rio de Janeiro, 2011.

[12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: informação e documentação: referências: elaboração. Rio de Janeiro, 2002.

[13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6024**: informação e documentação: numeração progressiva das seções de um documento escrito: apresentação. Rio de Janeiro, 2003.

[14] WIKIPEDIA. Charles Legeyt Fortescue. Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/Charles_Legeyt_Fortescue>. Acesso em: 05/04/2012.

[15] SKM Power Tools. PTW V6.5 Tutorial. Disponível em: <http://www.skm.com/PTW_V6.5_Tutorial.pdf>. Acesso em: 05/04/2012.

[16] BARON Global Optimization Software. Disponível em: <<http://archimedes.cheme.cmu.edu/baron/baron.html>>. Acesso em: 05/04/2012.

[17] NEOS Solvers: BARON. Disponível em: <<http://www.neos-server.org/neos/solvers/go:BARON/GAMS.html>>. Acesso em: 05/04/2012.

[18] CPFL Energia. **Proteção de Redes Aéreas de Distribuição – Sobrecorrente**, doc. 2912, ver 1.2, set. 2006.

[19] IEEE. **IEEE Electrical Engineering Dictionary**. Florida, USA: CRC Press, 2000.

APÊNDICE 1 – ROTINA DA FUNÇÃO OBJETIVO E RESTRICÇÕES

```

%Topologia Tippachon, 2009.
clear; clc;

%Parâmetros do Alimentador:-----
%Matriz Topologia:
% 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27
28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51
T=[0 1 2 2 1 5 5 7 8 8 10 10 12 7 14 15 15 17 17 19 19 21 22 23 23 23 26
26 28 28 22 31 32 33 33 31 36 36 38 39 39 41 38 43 43 45 45 47 47 49 49
1 2 3 4 5 6 7 8 10 9 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27
28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51
];
%Comprimento das Seções [km]:
L=[3.4 0.5 0.1 0.4 0.5 1 1 3 0.5 0.3 1.2 1 1 0.3 2.9 3 1.7 1.3 2 1.4 1 0.4
2.3 4 0.7 1.5 0.9 4.2 0.7 2.3 2.8 1.5 1.3 0.6 0.5 0.1 2.5 3.2 0.8 3 2.7 3
9.3 3.5 1.2 2 0.9 1.3 1.3 5 2];
%Vetor de Consumidores:
C=[0 0 0 55 0 89 0 145 85 1 200 2 55 0 55 57 105 243 147 47 107 30 117 135
95 50 80 120 93 145 65 80 102 20 30 0 65 50 1 220 95 125 167 141 21 93 106
90 17 145 67];
%Frequências de falta [(faults/km.year)*km]:
IF = [0.25.*L
0.17.*L];

%Parâmetro de Otimização:-----
%Número máximo de dispositivos (Religadores/Fusíveis):
ND(1)=2;
ND(2)=18;

%Seções onde não são instalados fusíveis (feeder main sections)
FR=[1 2 3 5 7 14 15 17 19 21 22 23 26 28 30 31 36 38 43 45 47 49 51];

%Nome do arquivo de exportação:
FN = 'ZAM_SAIPI.txt';

%Construção da Função Objetivo-----
%Conjunto de todas as seções
B=1:size(T,2);

%Conjuntos Ui, sendo i a linha e j a coluna
Ui=UpSec(T);

%Total de consumidores a jusante de cada seção
Tj=SetPD(C,T);

%Conjuntos Cij
Cij=setCij(Ui,T);

%Variáveis simbólicas
x=sym('x',[1 size(T,2)]);
y=sym('y',[1 size(T,2)]);

%Não existem fusíveis nas seções principais do alimentador (yj=1)
for i=1:length(y)

```

```

    if i==FR(find(FR==i,1))
        y(i)=1;
    end
end

%Existe um relé na subestação (x1=0 e y1=1)
x(1)=0;
y(1)=1;

%É possível instalar somente uma proteção em cada seção (xi+yi>=1)
NMPS=[x;y;ones(1,length(x))]; %Número Máximo de Proteções por Seção

%Número de relés/releg. disponíveis fora o da subestação
%Número de fusíveis disponíveis
NR=[sum(x),length(B)-(ND(1)+1)]; %(Sxi>=|B|-(r+1))
NF=[sum(y),length(B)-ND(2)]; %(Syi>=|B|-f)

%Produtório
M=multCij(Cij,x,y);

%Função Objetivo
Fobj=sym(zeros(size(T,2),size(T,2)));

for i=1:size(T,2)
    k=0;
    for a=1:size(Ui,2)
        if Ui(i,a)~=0
            j=Ui(i,a);
            if (i==j)
                Fobj(i,j)=Tj(j)*(2*IF(2,i)+IF(1,i)-IF(2,i)*x(j)-
(IF(2,i)+IF(1,i))*y(j));

                elseif j==1 && i>j
                    m=find(Cij(:,1)==i,1,'first');
                    Fobj(i,j)=Tj(j)*(2*IF(2,i)+IF(1,i)-IF(2,i)*x(j)-
(IF(2,i)+IF(1,i))*y(j))*M(m);

                elseif j>1 && i>j

m=find(Cij(:,1)==i,1,'first')+length(find(Cij(:,1)==i))-k-1;
                Fobj(i,j)=Tj(j)*(2*IF(2,i)+IF(1,i)-IF(2,i)*x(j)-
(IF(2,i)+IF(1,i))*y(j))*M(m);

                    end
                end
            end
        end
    end

Fobj=sum(sum(Fobj));

```

APÊNDICE 2 – FUNÇÕES AUXILIARES

```

function M=multCij(Cij,x,y)

M=sym('M',[1 size(Cij,1)]);

    for a=1:size(Cij,1)

        yprod=prod(y(Cij(a,1:length(nonzeros(Cij(a,:))))));
        xprod=prod(x(Cij(a,1:length(nonzeros(Cij(a,:))))));
        M(a)=yprod*xprod;

    end

end

function [Cij_aux]=setCij(Ui,T)
    i_max=size(T,2);

    i=1:i_max;
    k=1;

    for a=1:length(i)
        for b=1:a
            aux1=find(Ui(a,')==b);
            if size(aux1,2)~=0 && (aux1~=1)
                Cij_aux(k,:)= [Ui(a,1:aux1-1) zeros(1,size(T,2)-1-
length(Ui(a,1:aux1-1)))] ;
                k=k+1;
            end
        end
    end

end

end

```

APÊNDICE 3 – ROTINA DE EXPORTAÇÃO PARA O FORMATO GAMS

```

%Exportação para documento de texto, formato GAMS
clc
fid = fopen(FN,'wt'); %cria um doc de texto com nome definido por FN
x_aux=x(find(x~=0)); %seleciona apenas os valores de x não setados a 0
y_aux=y(find(y~=1)); %seleciona apenas os valores de y não setados a 1
xy_aux=[x_aux,y_aux];

%Variáveis Binárias
xy_aux2=[];
for i=1:length(xy_aux)-1
    xy_aux2=[xy_aux2 char(xy_aux(i)) ', '];
end

xy_aux2=['Binary variables ' xy_aux2 char(xy_aux(length(xy_aux))) ';'];
fprintf(fid,'%s\n',xy_aux2);

%Variável livre
fprintf(fid,'%s\n','Free variable f;');

%Nome e número das equações
neq=size(NMPS,2)+2; %número de equações (NMPS + NR + NF)
eq_aux=[];
for i=1:neq-1
    eq_aux = [eq_aux 'c' int2str(i) ', '];
end

eq_aux=['Equations FO, ' eq_aux 'c' int2str(neq) ';'];
fprintf(fid,'%s\n',eq_aux);
fprintf(fid,'\n');

%Número de relés
fprintf(fid,'%s\n',['c1 .. ' char(NR(1)) ' =g= ' char(NR(2)) ';']);

%Número de fusíveis
fprintf(fid,'%s\n',['c2 .. ' char(NF(1)) ' =g= ' char(NF(2)) ';']);

%Número máximo de proteções por seção
for i=1:length(NMPS)
    NMPS_aux=['c' int2str(i+2) ' .. ' char(NMPS(1,i)) '+' char(NMPS(2,i)) '
=g= ' char(NMPS(3,i)) ';'];
    fprintf(fid,'%s\n',NMPS_aux);
end

fprintf(fid,'\n');

%Função objetivo
fprintf(fid,'%s\n',['FO .. f =e= ' char(Fobj) ';']);
fprintf(fid,'\n');

%Fim
fprintf(fid,'%s\n',['Model ' FN(1:end-4) ' /all/;']);
fprintf(fid,'%s',['Solve ' FN(1:end-4) ' using MINLP minimizing f;']);

%fprintf(fid,'%s\n','Model ZAM_SAIFI_FB /all/;');
%fprintf(fid,'%s\n','Solve ZAM_SAIFI_FB using MINLP minimizing f;');

```

APÊNDICE 4 – RESPOSTA DO SERVIDOR DE OTIMIZAÇÃO

NEOS Server Home

NEOS Server Version 5.0
 Job# : 183621
 Password : phdCYjqB
 Solver : go:BARON:GAMS
 Start : 2012-05-03 08:36:42
 End : 2012-05-03 08:36:51
 Host : neos-4.chtc.wisc.edu

Disclaimer:

This information is provided without any express or implied warranty. In particular, there is no warranty of any kind concerning the fitness of this information for any particular purpose.

.....

GAMS Rev 237 LEX-LEG 23.7.3 x86_64/Linux 05/03/12 14:40:10 Page 1
 General Algebraic Modeling System
 Compilation

COMPILATION TIME = 0.003 SECONDS 2 Mb LEX237-237 Aug 23, 2011

GAMS Rev 237 LEX-LEG 23.7.3 x86_64/Linux 05/03/12 14:40:10 Page 2
 General Algebraic Modeling System
 Model Statistics SOLVE ZAM_SAIPI Using MINLP From line 66

MODEL STATISTICS

BLOCKS OF EQUATIONS	54	SINGLE EQUATIONS	53
BLOCKS OF VARIABLES	79	SINGLE VARIABLES	79
NON ZERO ELEMENTS	235	NON LINEAR N-Z	78
DERIVATIVE POOL	6	CONSTANT POOL	622
CODE LENGTH	5,248	DISCRETE VARIABLES	78

GENERATION TIME = 0.009 SECONDS 3 Mb LEX237-237 Aug 23, 2011

EXECUTION TIME = 0.009 SECONDS 3 Mb LEX237-237 Aug 23, 2011

GAMS Rev 237 LEX-LEG 23.7.3 x86_64/Linux 05/03/12 14:40:10 Page 3
 General Algebraic Modeling System
 Solution Report SOLVE ZAM_SAIPI Using MINLP From line 66

S O L V E S U M M A R Y

MODEL ZAM_SAIFI OBJECTIVE f
 TYPE MINLP DIRECTION MINIMIZE
 SOLVER BARON FROM LINE 66

**** SOLVER STATUS 1 Normal Completion
 **** MODEL STATUS 8 Integer Solution
 **** OBJECTIVE VALUE 20520.9960

RESOURCE USAGE, LIMIT 4.630 1000.000
 ITERATION COUNT, LIMIT 0 2000000000
 EVALUATION ERRORS 0 0

GAMS/BARON Jul 14, 2011 23.7.3 LEX 27723.27726 LEG x86_64/Linux

Branch And Reduce Optimization Navigator
 Nikolaos Sahinidis and Mohit Tawarmalani
 The Optimization Firm, LLC.

Total time elapsed: 000:00:05, in seconds: 4.64
 on parsing: 000:00:00, in seconds: 0.12
 on preprocessing: 000:00:00, in seconds: 0.15
 on navigating: 000:00:00, in seconds: 0.04
 on relaxed: 000:00:04, in seconds: 4.14
 on local: 000:00:00, in seconds: 0.07
 on tightening: 000:00:00, in seconds: 0.11
 on marginals: 000:00:00, in seconds: 0.00
 on probing: 000:00:00, in seconds: 0.01

Total no. of BaR iterations: 129
 Best solution found at node: -1
 Max. no. of nodes in memory: 12

=====

BARON version 9.3.1. Built: LNX-64 Tue Jun 7 13:20:25 EDT 2011

Reference:

Tawarmalani, M. and N. V. Sahinidis, A polyhedral
 branch-and-cut approach to global optimization,
 Mathematical Programming, 103(2), 225-249, 2005.

BARON is a product of The Optimization Firm, LLC.
 Parts of the BARON software were created at the

Solution = 20520.996 best solution found during preprocessing
 Best possible = 18655.4509091
 Absolute gap = 1865.5450909 optca = 1E-9
 Relative gap = 0.10000 optcr = 0.1

L O W E R L E V E L U P P E R M A R G I N A L

---- EQU FO 16028.926 16028.926 16028.926 1.000
 ---- EQU c1 48.000 48.000 +INF 2131.647
 ---- EQU c2 10.000 10.000 +INF 97.515
 ---- EQU c3 (EMPTY)
 ---- EQU c4 . 1.000 +INF .

---- EQU c5	.	1.000	+INF	.
---- EQU c6	1.000	1.000	+INF	162.389
---- EQU c7	.	1.000	+INF	.
---- EQU c8	1.000	1.000	+INF	537.965
---- EQU c9	.	1.000	+INF	.
---- EQU c10	1.000	1.000	+INF	1680.505
---- EQU c11	1.000	2.000	+INF	.
---- EQU c12	1.000	2.000	+INF	.
---- EQU c13	1.000	1.000	+INF	47.637
---- EQU c14	1.000	1.000	+INF	264.525
---- EQU c15	1.000	2.000	+INF	.
---- EQU c16	.	1.000	+INF	.
---- EQU c17	.	1.000	+INF	.
---- EQU c18	1.000	1.000	+INF	1849.245
---- EQU c19	.	1.000	+INF	.
---- EQU c20	1.000	1.000	+INF	644.525
---- EQU c21	.	1.000	+INF	.
---- EQU c22	1.000	1.000	+INF	816.853
---- EQU c23	.	1.000	+INF	.
---- EQU c24	.	1.000	+INF	.
---- EQU c25	.	.	+INF	4557.819
---- EQU c26	1.000	1.000	+INF	243.485
---- EQU c27	1.000	2.000	+INF	.
---- EQU c28	.	1.000	+INF	.
---- EQU c29	1.000	2.000	+INF	.
---- EQU c30	.	1.000	+INF	.
---- EQU c31	1.000	2.000	+INF	.
---- EQU c32	.	1.000	+INF	.
---- EQU c33	.	.	+INF	6159.729
---- EQU c34	1.000	1.000	+INF	649.569
---- EQU c35	1.000	2.000	+INF	.
---- EQU c36	1.000	2.000	+INF	.
---- EQU c37	1.000	2.000	+INF	.
---- EQU c38	.	1.000	+INF	.
---- EQU c39	1.000	1.000	+INF	556.735
---- EQU c40	.	1.000	+INF	.
---- EQU c41	1.000	2.000	+INF	.
---- EQU c42	1.000	1.000	+INF	492.285
---- EQU c43	1.000	1.000	+INF	433.305
---- EQU c44	1.000	1.000	+INF	22.185
---- EQU c45	.	1.000	+INF	.
---- EQU c46	1.000	1.000	+INF	706.715
---- EQU c47	.	1.000	+INF	.
---- EQU c48	1.000	1.000	+INF	402.365
---- EQU c49	.	1.000	+INF	.
---- EQU c50	1.000	1.000	+INF	229.045
---- EQU c51	.	1.000	+INF	.
---- EQU c52	1.000	1.000	+INF	1042.985
---- EQU c53	.	1.000	+INF	.

LOWER LEVEL UPPER MARGINAL

---- VAR x2	.	1.000	1.000	-1733.541
---- VAR x3	.	1.000	1.000	-2064.361
---- VAR x4	.	1.000	1.000	-2297.776
---- VAR x5	.	1.000	1.000	-2040.017
---- VAR x6	.	1.000	1.000	-2684.742
---- VAR x7	.	1.000	1.000	-1903.983
---- VAR x8	.	1.000	1.000	-4127.400
---- VAR x9	.	1.000	1.000	-2058.237

----	VAR x10	.	1.000	1.000	-2070.210
----	VAR x11	.	1.000	1.000	-2220.084
----	VAR x12	.	1.000	1.000	-2415.552
----	VAR x13	.	1.000	1.000	-2117.057
----	VAR x14	.	1.000	1.000	-1239.895
----	VAR x15	.	1.000	1.000	-1272.127
----	VAR x16	.	1.000	1.000	-4009.962
----	VAR x17	.	1.000	1.000	-1486.599
----	VAR x18	.	1.000	1.000	-2829.875
----	VAR x19	.	1.000	1.000	-1500.471
----	VAR x20	.	1.000	1.000	-2959.686
----	VAR x21	.	1.000	1.000	-1825.579
----	VAR x22	.	1.000	1.000	-2036.923
----	VAR x23	.	.	1.000	EPS
----	VAR x24	.	1.000	1.000	-2466.932
----	VAR x25	.	1.000	1.000	-2043.587
----	VAR x26	.	1.000	1.000	-1565.343
----	VAR x27	.	1.000	1.000	-2016.132
----	VAR x28	.	1.000	1.000	-1547.799
----	VAR x29	.	1.000	1.000	-2043.349
----	VAR x30	.	1.000	1.000	-1861.857
----	VAR x31	.	.	1.000	EPS
----	VAR x32	.	1.000	1.000	-2935.032
----	VAR x33	.	1.000	1.000	-1959.807
----	VAR x34	.	1.000	1.000	-2075.223
----	VAR x35	.	1.000	1.000	-2085.477
----	VAR x36	.	1.000	1.000	-1182.435
----	VAR x37	.	1.000	1.000	-2716.007
----	VAR x38	.	1.000	1.000	-980.849
----	VAR x39	.	1.000	1.000	-1960.423
----	VAR x40	.	1.000	1.000	-2736.132
----	VAR x41	.	1.000	1.000	-2665.932
----	VAR x42	.	1.000	1.000	-2217.582
----	VAR x43	.	1.000	1.000	EPS
----	VAR x44	.	1.000	1.000	-2922.257
----	VAR x45	.	1.000	1.000	-1065.849
----	VAR x46	.	1.000	1.000	-2565.632
----	VAR x47	.	1.000	1.000	-1221.297
----	VAR x48	.	1.000	1.000	-2380.582
----	VAR x49	.	1.000	1.000	-1306.416
----	VAR x50	.	1.000	1.000	-3297.882
----	VAR x51	.	1.000	1.000	-1576.427
----	VAR y4	.	.	1.000	EPS
----	VAR y6	.	.	1.000	EPS
----	VAR y8	.	.	1.000	EPS
----	VAR y9	.	1.000	1.000	-66.855
----	VAR y10	.	1.000	1.000	-36.153
----	VAR y11	.	.	1.000	EPS
----	VAR y12	.	.	1.000	EPS
----	VAR y13	.	1.000	1.000	-96.675
----	VAR y16	.	.	1.000	EPS
----	VAR y18	.	.	1.000	EPS
----	VAR y20	.	.	1.000	EPS
----	VAR y24	.	.	1.000	EPS
----	VAR y25	.	1.000	1.000	-26.080
----	VAR y27	.	1.000	1.000	EPS
----	VAR y29	.	1.000	1.000	-25.492
----	VAR y32	.	.	1.000	EPS
----	VAR y33	.	1.000	1.000	-16.875
----	VAR y34	.	1.000	1.000	-44.091

```

---- VAR y35      .      1.000  1.000 -55.095
---- VAR y37      .      .      1.000  EPS
---- VAR y39      .      1.000  1.000 -14.491
---- VAR y40      .      .      1.000  EPS
---- VAR y41      .      .      1.000  EPS
---- VAR y42      .      .      1.000  EPS
---- VAR y44      .      .      1.000  EPS
---- VAR y46      .      .      1.000  EPS
---- VAR y48      .      .      1.000  EPS
---- VAR y50      .      .      1.000  EPS
---- VAR f        -INF 20520.996 +INF .

```

```

**** REPORT SUMMARY :    0  NONOPT
                        0  INFEASIBLE
                        0  UNBOUNDED
                        0  ERRORS

```

EXECUTION TIME = 0.001 SECONDS 2 Mb LEX237-237 Aug 23, 2011

```

USER: NEOS Server          G100907:1412AS-LNX
      University of Wisconsin-Madison      DC8499
      License for teaching and research at degree granting institutions

```

**** FILE SUMMARY

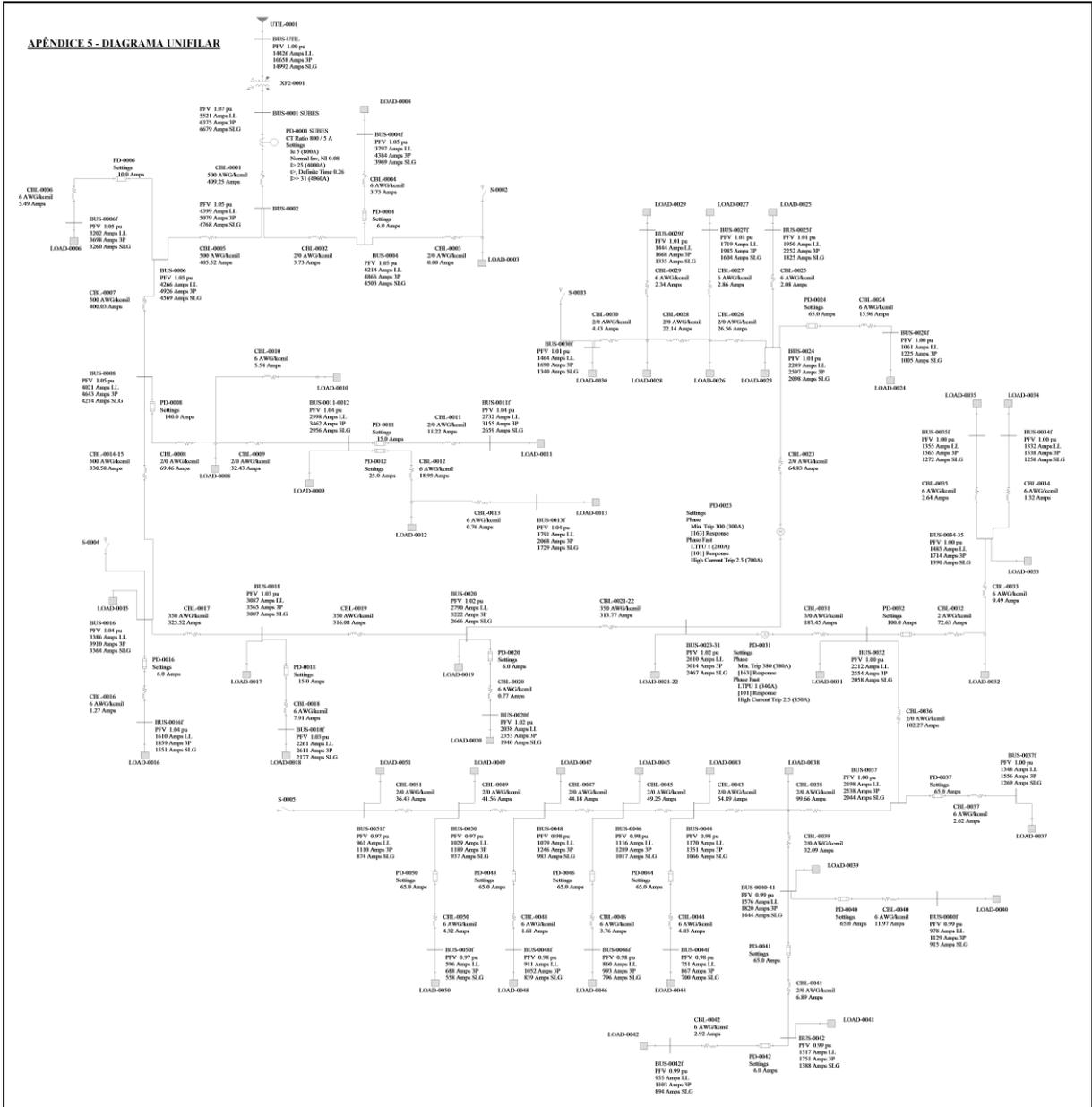
```

Input  /scratch/neos/solver/jobs/183621/MODEL.gms
Output /scratch/neos/solver/jobs/183621/solve.out

```

NEOS Server

APÉNDICE 5 - DIAGRAMA UNIFILAR



ANEXO 1 – FUNÇÕES AUXILIARES

Cortesia: Me. Gustavo Dorneles Ferreira

```

function pd = SetPD(C,T)
ds = DwSec(T);
n_sec = size(T,2);
pd = zeros(1,n_sec,'single');
for(i=1:n_sec)
    pd(1,i) = sum(C(1,nonzeros(ds(i,:))));
end
end
%-----
function [sec] = DwSec(T)
%return the downstream sections for each feeder section
np=size(T,2);
sec=[];
for(i=1:np)
    n=1;
    search=[];
    search(n)=T(2,i);
    m=1;
    sec(i,m)=i;
    while(n>0)
        for(j=1:np)
            if(T(1,j)==search(1))
                m=m+1;
                sec(i,m)=j;
                n=n+1;
                search(n)=T(2,j);
            end
        end
        search(1)=[];
        n=length(search);
    end
end
end

function [trc] = UpSec(T)
%Retorna os trechos à montante de cada trecho até a fonte, incluindo o
%próprio.
nd=length(T(1,:));
trc=[];
for(i=1:nd)
    n=1;
    trc(i,n)=i;
    m=1;
    search=[];
    search(m)=T(1,i);
    while(m>0)
        for(j=1:nd)
            if(T(2,j)==search(1))
                n = n + 1;
                trc(i,n)=j;
                m=m+1;
                search(m)=T(1,j);
            end
        end
        search(1)=[]; m=length(search); end end

```

ANEXO 2 – DADOS DO SISTEMA

Seção	Comp. (km)	Carga (kVA)	Número de Consumidores	Faltas Perm. (faltas/ano)	Faltas Temp. (faltas/ano)
1	3,4	0	0	0,578	0,85
2	0,5	0	0	0,085	0,125
3	0,1	0	0	0,017	0,025
4	0,4	150	55	0,068	0,1
5	0,5	0	0	0,085	0,125
6	1	220	89	0,17	0,25
7	1	0	0	0,17	0,25
8	3	1250	145	0,51	0,75
9	0,5	90	85	0,085	0,125
10	0,3	90	1	0,051	0,075
11	1,2	445	200	0,204	0,3
12	1	720	2	0,17	0,25
13	1	30	55	0,17	0,25
14	0,3	0	0	0,051	0,075
15	2,9	150	55	0,493	0,725
16	3	50	57	0,51	0,75
17	1,7	60	105	0,289	0,425
18	1,3	310	243	0,221	0,325
19	2	340	147	0,34	0,5
20	1,4	30	47	0,238	0,35
21	1	2130	107	0,17	0,25
22	0,4	250	30	0,068	0,1
23	2,3	780	117	0,391	0,575
24	4	610	135	0,68	1
25	0,7	80	95	0,119	0,175
26	1,5	60	50	0,255	0,375
27	0,9	110	80	0,153	0,225
28	4,2	590	120	0,714	1,05
29	0,7	90	93	0,119	0,175
30	2,3	170	145	0,391	0,575
31	2,8	480	65	0,476	0,7
32	1,5	2400	80	0,255	0,375
33	1,3	210	102	0,221	0,325
34	0,6	50	20	0,102	0,15
35	0,5	100	30	0,085	0,125
36	0,1	0	0	0,017	0,025
37	2,5	100	65	0,425	0,625
38	3,2	480	50	0,544	0,8
39	0,8	500	1	0,136	0,2
40	3	450	220	0,51	0,75

41	2,7	150	95	0,459	0,675
42	3	110	125	0,51	0,75
43	9,3	60	167	1,581	2,325
44	3,5	150	141	0,595	0,875
45	1,2	50	21	0,204	0,3
46	2	140	93	0,34	0,5
47	0,9	36	106	0,153	0,225
48	1,3	60	90	0,221	0,325
49	1,3	30	17	0,221	0,325
50	5	160	145	0,85	1,25
51	2	1350	67	0,34	0,5